



КАЗАНСКИЙ
ФИЗИКО-
ТЕХНИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ

ИМЕНИ
Е. К. ЗАВОЙСКОГО

2009

ЕЖЕГОДНИК

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
КАЗАНСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР

КАЗАНСКИЙ
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ

ИМЕНИ Е. К. ЗАВОЙСКОГО

2009



ЕЖЕГОДНИК

ФИЗТЕХПРЕСС

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 2009.
Ежегодник. – Казань: ФизтехПресс, 2010. 232 с.

ISBN 978-5-94469-024-1

Под общей редакцией
К. М. Салихова

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, Х. Л. Гайнутдинов, Н. А. Карташёва, Л. В. Мосина, И. В. Овчинников, В. Ю. Петухов,
В. В. Самарцев, Г. Б. Тейтельбаум, Я. В. Фаттахов, С. К. Черников

Печатается по решению
Учёного совета Учреждения Российской академии наук Казанского физико-технического института
им. Е. К. Завойского КазНЦ РАН

В ежегоднике представлены материалы, отражающие деятельность Учреждения Российской академии наук
Казанского физико-технического института имени Е. К. Завойского Казанского научного центра РАН за 2009 год.
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 978-5-94469-024-1

© КФТИ КазНЦ РАН, 2010
© Обложка Аксёнов И.А., 2010

Ответственный редактор С. М. Ахмин
Редакторы Н. А. Карташёва, 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 11.05.2010
Формат 60х90/8. Бумага мелованная
Гарнитура Times. Печать офсетная
Тираж 225 экз.

Предисловие редактора

Говоря о жизни нашего института в 2009 году, я бы хотел выделить два аспекта: в чём этот год был похож на предыдущие годы и чем этот год оказался примечательным.

Как всегда, все сотрудники нашего физтеха самоотверженно трудились. В 2009 году мы успешно справились со всеми научными исследованиями по планам РАН, грантам и договорам. Основные научные результаты, полученные сотрудниками физтеха, отражены в этом выпуске ежегодника. Достижения наших учёных были отмечены на уровне Республики Татарстан, Российской Федерации и мировом уровне. Об этом также довольно подробно написано в ежегоднике. Мы не снижаем уровня выпуска научной продукции, статей в рецензируемых международных и всероссийских журналах, пишем книги и активно участвуем в научных конференциях.

2009 год был первым годом нашей работы в условиях жёстко фиксированной численности научных сотрудников и сотрудников вспомогательных служб, которые получают зарплату из бюджета. В этих условиях нам пришлось решать весьма непростую задачу: найти способ принять на работу пятерых молодых людей, которые успешно завершили аспирантуру и которых мы хотели бы видеть в составе нашего института. Для этого пришлось несколько изменить кадровую политику в институте. До 2009 года все ставки были расписаны по лабораториям. Если в лаборатории высвобождалась ставка, то сама лаборатория решала, как ею распорядиться. Если сотрудник переходил из одной лаборатории в другую, то он переходил со ставкой и рабочим местом (как правило). Сейчас мы принимаем на работу перспективных молодых учёных после окончания аспирантуры на высвобождающиеся ставки не обязательно в ту же лабораторию, в которой освободилась ставка. Новым моментом в нашей работе можно считать, что мы стали принимать перспективных молодых учёных на работу полностью на ставки по гранту. В принципе, такой ход развития событий мог бы и должен бы стать типичным. Мешает этому то, что финансирование грантов, как правило, начинается обычно только во втором квартале. И ещё одна особенность 2009 года: мировой финансовый и экономический кризис. Конечно, он затронул всех, и в том числе наш институт. Бюджет института был относительно сокращён. Мы не получили достаточного финансирования на содержание здания, коммунальные расходы и не дополучили запланированных денег на закупку уникального оборудования.

Заметным событием для нас стало участие в открытом конкурсе Роснауки на право заключения государственных контрактов на выполнение научно-исследовательских работ для государственных нужд в рамках федеральной целевой программы “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России” на 2009–2013 годы по лоту “Проведение научных исследований коллективами научно-образовательных центров (НОЦ) в области нанотехнологий и наноматериалов”. Наш НОЦ “Спиновая физика, спиновая химия и спиновая технология” стал одним из победителей этого конкурса. Такая форма финансирования науки – это фактически альтернатива практике бюджетного финансирования, когда институт получает суммарные деньги на выполнение всех плановых исследований и содержание здания. По-видимому, доля такого адресного финансирования на реализацию конкретных заданий будет возрастать. Конечно, это обязывает институт быть достаточно конкурентоспособным, быть способным выигрывать конкурсы проектов.

В 2009 году исполнилось 20 лет журналу “Applied Magnetic Resonance”. Трудно переоценить роль этого журнала в позиционировании нашего института в мировом сообществе радиоспектроскопистов, прежде всего, в сообществе спектроскопистов электронного парамагнитного резонанса.

Заметным событием 2009 года я считаю и издание книги “Electron Paramagnetic Resonance: From Fundamental Research to Pioneering Applications & Zavoisky Award”. Wellington, New Zealand: AXAS Publishing.

В подготовке очередного выпуска ежегодника участвовали многие сотрудники института. Всем большое спасибо. Особые слова благодарности я бы хотел адресовать В. К. Воронковой, Н. А. Карташёвой, С. М. Ахмину, Л. В. Мосиной и О. Б. Яндугановой. Это они “выдали на гора” конечный продукт – ежегодник-2009 – очередные страницы летописи Казанского физтеха.

К. М. Салихов

Содержание

- 9 Структура института

Важнейшие события года

- 12 Двадцать лет журналу “Applied Magnetic Resonance”
 (“Применения магнитного резонанса”)
К. М. Салихов

Важнейшие результаты года

- 14 Государственная премия Республики Татарстан
 15 Международная премия им. Дж. Гиббонса Института инженеров
 электротехники и электроники (IEEE) за 2009 год
 16 Важнейшие результаты фундаментальных исследований,
 рекомендованные Учёным советом КФТИ КазНЦ РАН в отчёт РАН
 за 2009 год
 19 Итоги конкурса научных работ сотрудников КФТИ 2009 года

Научные сообщения

- 21 Обнаружение и исследование эффекта спинового экранирования
 в слоистых тонкоплёночных системах сверхпроводник/ферромагнетик
 методом ядерного магнитного резонанса
И. А. Гарифуллин, Н. Н. Гарифьянов, Р. И. Салихов
 28 Фемтосекундный эхо-процессинг в полимерной плёнке, допированной
 красителем, при комнатной температуре
*Г. М. Сафиуллин, В. Г. Никифоров, В. С. Лобков, В. В. Самарцев,
 А. В. Леонтьев*
 34 Фазовый переход в баллистических наноконтактах никеля
Р. Г. Гатиятов, В. Н. Лисин, А. А. Бухараев
 38 Формирование слоёв дисилицида железа при импульсной обработке
 плёнок железа, осаждённых на кремний магнетронным распылением
*Р. И. Баталов, Р. М. Баязитов, Г. А. Новиков, В. А. Шустов,
 Ю. Н. Осин*
 43 Бесконтактная дифракционная методика измерения температуры
 поверхности образца при импульсном световом отжиге
М. Ф. Галяутдинов, Б. Ф. Фаррахов, Я. В. Фаттахов, М. В. Захаров
 47 Вклад обменного и диполь-дипольного взаимодействий в форму
 спектра ЭПР растворов нитроксильных радикалов
К. М. Салихов

51	Моделирование квантовой телепортации в реакционных центрах фотосинтеза <i>Ю. Е. Кандрашкин, К. М. Салихов</i>
56	Новый алгоритм определения абсолютных значений параметров спин-гамильтониана триплетного состояния с симметричным g -тензором <i>А. Е. Мамбетов</i>
60	Изучение концентрационных зависимостей параметров сплавов $Ni_{1-x}Fe_x$ в рамках приближения когерентного потенциала метода Корринги-Кона-Ростокера <i>В. В. Клековкина, Р. М. Аминова</i>
62	Обменные взаимодействия и спиновая динамика в системах, построенных из кластеров <i>В. К. Воронкова, Р. Т. Галеев, Л. В. Мингалиева, А. А. Суханов, И. Т. Хайружудинов</i>
67	ЭПР интерметаллида $YbRh_2Rb$ <i>А. А. Суханов, В. А. Иваньшин</i>
70	Электронная диффузия и быстрая релаксация в CdS <i>К. В. Иванин, А. В. Леонтьев, В. С. Лобков, В. В. Самарцев, Г. М. Сафиуллин</i>
73	Спиновый транспорт в гетероструктуре $GaAs/AlGaAs$ при комнатной температуре <i>К. В. Иванин, А. В. Леонтьев, В. С. Лобков, В. В. Самарцев</i>
76	Лазерное управление когерентными осцилляциями молекул в жидкости в субпикосекундном диапазоне <i>А. Г. Шмелёв, В. Г. Никифоров, Г. М. Сафиуллин, В. С. Лобков</i>
80	Изучение каталитических свойств наночастиц Ni методом атомно-силовой микроскопии и вольтамперометрии <i>С. А. Зиганишина, А. П. Чукланов, Д. В. Лебедев, Д. А. Бизяев, А. А. Бухараев</i>
87	Углеродные нанотрубные автокатоды на никелевых ядрах <i>Е. Ф. Куковицкий, С. Г. Львов</i>
91	Взаимодействие плазмон-поляритонных волн с нанощелями и нанопроволоками на тонкой плёнке золота <i>А. Л. Степанов, Е. В. Нурдин, Ю. Н. Осин</i>
95	Исследование структурных, оптических и магнитных свойств титаната бария ($BaTiO_3$), имплантированного ионами кобальта <i>Н. И. Халитов, В. Ф. Валеев, Ю. И. Гатиятова, Ю. Н. Осин, Л. Р. Тагиров, Р. И. Хайбуллин</i>
99	Исследование методом ЭПР уровня Cu^{2+} -церулоплазмينا в крови онкоурологических больных <i>М. И. Ибрагимова, А. И. Чушиников, В. Ю. Петухов, Е. П. Жеглов</i>
102	Парамагнитные ассоциаты примесных дефектов в кристалле $Ba_{1-x}Ni_xF_{2+y}$: данные изучения методом ЭПР <i>В. А. Уланов, Г. С. Шакуров, М. М. Зарипов</i>
106	Исследование структуры примесных центров трёхвалентного хрома в синтетическом форстерите методом перестраиваемой по частоте ЭПР-спектроскопии <i>А. А. Коновалов, В. Ф. Тарасов</i>
110	ЭПР-исследование спин-переходных процессов в трис-дитиокарбаматах $Fe(III)$ <i>Т. А. Иванова, О. А. Туранова, И. В. Овчинников</i>
115	Температурные зависимости параметров спектров ЭПР спин-переходных комплексов $Fe(III)$ в ионообменном полимере <i>Г. П. Вишневская, И. В. Овчинников, Е. Н. Фролова</i>
120	Магнитометры с токовым датчиком магнитного поля: результаты и перспективы <i>В. А. Гончаров</i>

- 123 Эффекты магнитных поляронов в поведении индуцированной намагниченности EuV_6 по данным магнитного резонанса
Т. С. Альтиулер, Ю. В. Горюнов
- 128 Эффекты пиннинга в керамических образцах $\text{SmO}_{1-x}\text{F}_x\text{FeAs}$ по данным микроволнового поглощения
Н. Ю. Панарина, Ю. И. Таланов, Т. С. Шапошникова, Н. Р. Бейсенгулов, Е. Л. Вавилова, В. Е. Катаев
- 135 Преобразование однофотонных волновых пакетов в устройствах квантовой памяти с помощью перестраиваемого резонатора
А. А. Калачёв
- 138 Оптическая спектроскопия на основе некогерентного фотонного эха
К. Р. Каримуллин, В. В. Самарцев
- 144 Экспериментальная установка для исследования акустооптических явлений в магнитных материалах
С. А. Мигачёв, М. Ф. Садыков, Д. А. Иванов, М. М. Шакирзянов
- 148 О роли спин-спиновых взаимодействий в экспериментах по акустическому ЯМР
М. М. Шакирзянов
- 151 Решёточные, электрические и магнитные эффекты в манганитах лантана $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($x = 0.125, 0.15, 0.175$)
Х. Г. Богданова, А. Р. Булатов
- 155 Использование различных технологий распараллеливания при вычислении спектров ЭПР
С. К. Черников, И. В. Русских, А. В. Рябинин
- 160 Применение метода ЭПР для оценки уровня продукции оксида азота в мозге крыс при ишемическом инсульте
В. В. Андрианов, В. С. Июдин, Г. Г. Яфарова, Т. Х. Гайнутдинова, Х. Л. Гайнутдинов

Аспиранты и молодые учёные

- 163 Аспиранты и молодые учёные

Персоналии

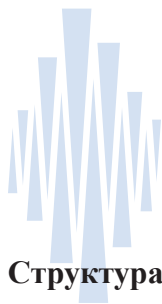
- 165 Максут Мухамедзянович Зарипов. К 80-летию со дня рождения
Л. К. Аминов, К. М. Салихов, М. С. Тагиров
- 166 Минрахман Абдрахманович Файзуллин. К 80-летию со дня рождения
Н. А. Карташёва, Е. Ф. Куковицкий, Ю. И. Таланов, В. Ф. Тарасов, И. А. Файзрахманов
- 167 Самарцев Виталий Владимирович. К 70-летию со дня рождения
Д. Д. Власова, И. В. Евсеев, Н. В. Знаменский, В. А. Зуйков, А. А. Калачёв, А. А. Калинин, К. Р. Каримуллин, И. З. Латыпов, В. Н. Лисин, Т. Г. Митрофанова, А. В. Наумов, С. В. Петрушкин, Е. А. Попов, И. И. Попов, В. С. Романов, Ю. З. Фаттахова, Р. Н. Шахмуратов, А. М. Шегада, А. В. Шкаликов
- 169 Памяти Михаила Львовича Блатта. К 100-летию со дня рождения
Ю. И. Таланов
- 170 Памяти Дмитрия Яковлевича Осокина
А. И. Андреева, В. Л. Ермаков, В. Л. Матухин, И. В. Овчинников, В. А. Шагало
- 171 Памяти Юрия Серафимовича Грезнева
Н. К. Соловаров

Научно-организационная деятельность

- 173 Выездная сессия Научного совета по физике конденсированных сред
в Казани
В. К. Воронкова
- 174 О работе Учёного совета КФТИ КазНЦ РАН
В. К. Воронкова
- 175 Выездное заседание Президиума КазНЦ РАН
В. К. Воронкова
- 176 IX Международный симпозиум по фотонному эхо и когерентной
спектроскопии (ФЭКС'2009)
В. В. Самарцев
- 179 I съезд молодых учёных РАН центрального региона
С. А. Зиганишина
- 181 Вышла в свет книга об электронном парамагнитном резонансе
К. М. Салихов
- 182 Визит профессора Герда Котэ в физтех
В. К. Воронкова
- 183 Журнал "Applied Magnetic Resonance"
Л. В. Мосина
- 184 20 лет Международного общества ЭПР в зеркале "EPR newsletter"
и многое другое
Л. В. Мосина
- 186 Международная премия им. Е. К. Завойского 2009
Л. В. Мосина
- 187 Премия им. М. Л. Блатта 2009
В. Н. Лисин
- 188 Репортаж с торжественного заседания, посвящённого проводам
старого и встрече Нового года
С. А. Зиганишина, Д. Д. Власова
- 189 Выступление К. М. Салихова на торжественном собрании,
посвящённом проводам старого и встрече Нового года
(29 декабря 2009 года)

Цифры и факты

- 193 2009 год в цифрах
- 194 Темы, финансируемые из госбюджета
(Отделение физических наук РАН)
- 195 Проекты, финансируемые на конкурсной основе
- 197 Важнейшие результаты фундаментальных исследований, вошедшие
в отчёт РАН в 2008 году
- 198 Публикации сотрудников института
- 207 Защиты, награды, стипендии
- 208 Участие сотрудников института в преподавательской деятельности
- 209 Конференции, организованные КФТИ и при участии КФТИ
- 216 Участие сотрудников института в конференциях
- 227 Участие в выставках
- 227 Гости института



Структура института

Дирекция

Директор

Салихов Кев Минуллинович
член-корр. РАН, академик АН РТ,
д.ф.-м.н.

Зам. директора по научной работе

Тарасов Валерий Фёдорович
д.ф.-м.н.

Зам. директора по общим вопросам

Аджалиев Юнус Амзанович

Учёный секретарь

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

Учёный совет

(утверждён на заседании Бюро ОФН 12 ноября 2009 г.)

Салихов Кев Минуллинович, член-корр. РАН
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.

Калачёв Алексей Алексеевич, к.ф.-м.н.

Лисин Валерий Николаевич, к.ф.-м.н.

Моисеев Сергей Андреевич, д.ф.-м.н.

Петухов Владимир Юрьевич, д.ф.-м.н.

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.

Шакирзянов Масгут Мазитович, д.ф.-м.н.

Курбатова Надежда Васильевна

технический секретарь

Научные и научно-вспомогательные подразделения*Отдел химической физики*

Заведующий: член-корр. РАН, академик АН РТ, проф., д.ф.-м.н., заслуженный деятель науки РФ
Салихов Кев Минуллин

Лаборатория квантовой динамики и информатики

Заведующий: член-корр. РАН, академик АН РТ, проф., д.ф.-м.н., заслуженный деятель науки РФ
Салихов Кев Минуллин

Лаборатория физики и химии поверхности

Заведующий: член-корр. АН РТ, д.ф.-м.н., заслуженный деятель науки РТ
Бухараев Анастас Ахметович

Лаборатория спиновой физики и спиновой химии

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

Лаборатория быстротекущих молекулярных процессов

Заведующий: к.ф.-м.н. Лобков Владимир Сергеевич

Группа наносистем для водородной энергетики

Руководитель: д.ф.-м.н., заслуженный деятель науки РТ
Сулейманов Наиль Муратович

Группа роста кристаллов

Руководитель: Куковицкий Евгений Филиппович

Отдел радиационных воздействий на материалы

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

Лаборатория радиационной физики

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

Лаборатория интенсивных радиационных воздействий

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

Лаборатория радиационной химии и радиобиологии

Заведующий: д.ф.-м.н., заслуженный деятель науки РТ Петухов Владимир Юрьевич

Отдел медицинской физики

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

Лаборатория методов медицинской физики

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

Лаборатория биофизики

Заведующий: проф., д.б.н. Гайнутдинов Халил Латыпович

Лаборатория магнитоакустики

Заведующий: д.ф.-м.н., заслуженный деятель науки РТ Шакирзянов Масгут Мазитович

Лаборатория радиоспектроскопии диэлектриков

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

Лаборатория молекулярной радиоспектроскопии

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

Лаборатория физики перспективных материалов

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

Лаборатория нелинейной оптики

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

Лаборатория моделирования физико-механических процессов и систем

Заведующий: к.т.н. Черников Сергей Константинович

Отдел криогенной техники

Заведующий: к.ф.-м.н. Хлебников Святослав Яковлевич

Отдел телекоммуникационных технологий

Заведующий: к.ф.-м.н. Мусин Виталий Мухбирович

Научно-техническая библиотека

Заведующая: Фалина Гульшат Эльгизовна

Редакция журнала "Applied Magnetic Resonance"

Главный редактор: член-корр. РАН, академик АН РТ, проф., д.ф.-м.н. Салихов Кев Минуллин
Зам. гл. редактора по научно-редакционным вопросам, ответственный секретарь: к.ф.-м.н. Мосина Ляйля Васильевна
Зам. гл. редактора по издательским вопросам: к.ф.-м.н. Ахмин Сергей Михайлович

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: Петрушкин Сергей Валериевич

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
ситуациям: Галеева Фарида Габидиновна

Экспериментальная мастерская

Мастер-станочник: Гайнутдинов Наиль
Валеевич

Группа научно-технической информации (НТИ)

Вед. инженер по НТИ и ведению архива: Карташёва
Нина Алексеевна

Административно-хозяйственная часть

Зав. хозяйством: Куприянова Ольга Олеговна

Группа по эксплуатации зданий

Руководитель (главный энергетик):
Аджалиева Зухра Тазиевна

Группа текущего ремонта зданий и сооружений

Руководитель: Гнездилов Иван Дмитриевич

Группа по организации государственных закупок

Гл. специалист: Садыков Нияз Рифгатович

Гараж

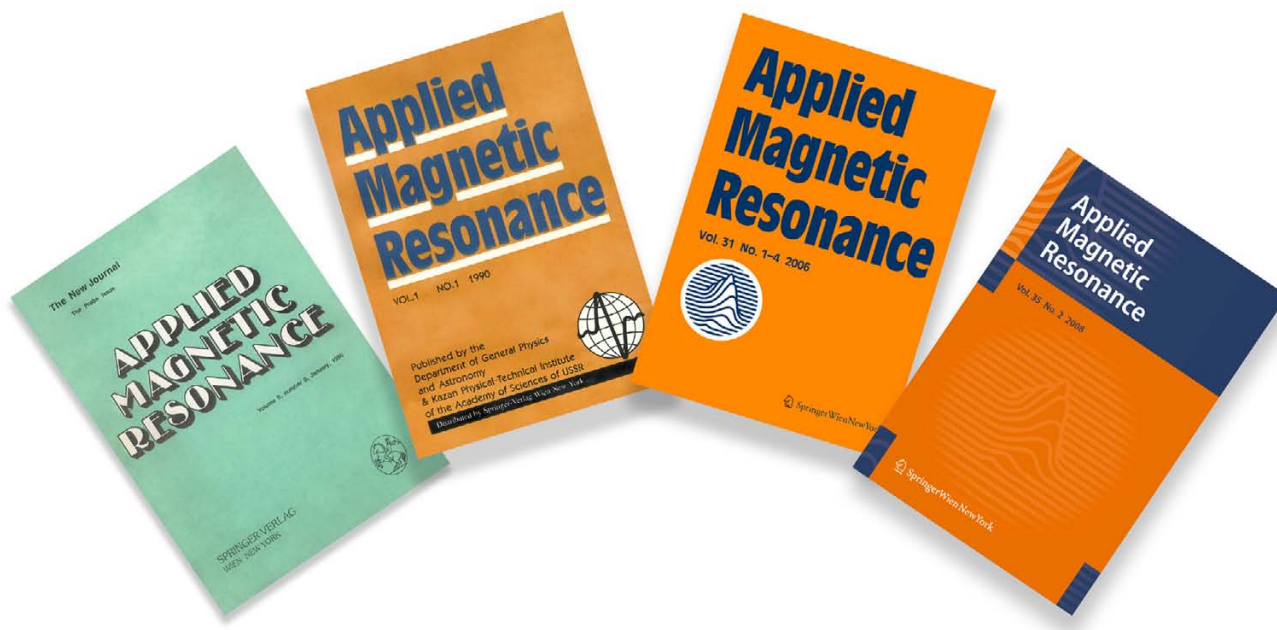
Механик: Лукин Иван Тимофеевич

ВАЖНЕЙШИЕ СОБЫТИЯ ГОДА

Двадцать лет журналу “Applied Magnetic Resonance” (“Применения магнитного резонанса”)

Весной 1988 года, в разгар перестройки в нашей стране, я был избран директором Казанского физико-технического института им. Е. К. Завойского Казанского филиала Академии наук СССР. В свою предвыборную программу я включил пункт о создании на базе КФТИ всесоюзного журнала по магнитному резонансу, поскольку всегда считал удивительным, что на родине электронного парамагнитного резонанса нет специализированного журнала. Вскоре после моего избрания в Казани состоялась Всесоюзная конференция по применениям магнитного резонанса. В СССР такие конференции заканчивались принятием решения, в котором формулировались рекомендации по дальнейшему развитию, в данном случае, магнитного резонанса. Эти решения с рекомендациями

направлялись организаторами конференции руководству Академии наук СССР и т.д. Во время принятия решения конференции я предложил включить пункт о необходимости издания в СССР журнала по магнитному резонансу. На это кто-то из коллег сказал, что вряд ли это поможет, так как решения предыдущих конференций на этот счёт ни к чему не привели. Но я настоял, убедительно попросил включить этот пункт. Решение о создании такого журнала поддержал акад. Андрей Станиславович Боровик-Романов, который в то время курировал издание журналов в Академии наук СССР. Вооружившись этими рекомендациями, подготовил обращение о создании всесоюзного журнала по магнитному резонансу к руководству Академии наук СССР. Когда я оказался в



Обложка журнала “Applied Magnetic Resonance” в разные годы своего двадцатилетнего существования.

Москве в отделе журналов Академии наук, сотрудник отдела объяснил мне, что таких обращений у них много и что очередь на рассмотрение моего обращения у них наступит через пять лет. Но я был избран директором на пять лет, и поэтому предложенная перспектива меня никак не могла устроить. Тогда я спросил, какова очередь на международные журналы. Оказалось, что нет такой очереди, и появилась возможность быть первым. Первоначально я стал думать о журнале, который бы издавался учёными трёх стран: СССР, ГДР и ФРГ. У меня были коллеги-учёные в обоих немецких государствах, и я думал, что такой журнал поможет нам всем лучше работать и сотрудничать. Своими соображениями я поделился с проф. Ханнсом Фишером из Цюрихского университета. После наших обсуждений осознал, что это должен быть международный журнал. Я решил выяснить отношение к этому и других ведущих учёных в области магнитного резонанса. По телефону разыскал в США проф. Рихарда Эрнста из Высшей технической школы (Цюрих, Швейцария). У него были сомнения, так как к этому времени в мире уже издавался ряд журналов по магнитному резонансу. Но он всё-таки поддержал идею нового журнала и согласился войти в редакционную коллегию. Вскоре идея создания нового журнала получила широкую поддержку мирового научного сообщества.

Но прежде, чем журнал начал издаваться, пришлось преодолеть бюрократические барьеры. В то время принципиальное решение о выпуске нового журнала принимали в ЦК КПСС. Во время годового общего собрания Академии наук СССР мне сказали, что решение принимает человек, который сидел в президиуме собрания рядом с Президентом АН СССР акад. Гурием Ивановичем Марчуком. В перерыве между заседаниями я подошел к ним, кратко сформулировал своё предложение, и судьба журнала была решена. Правда, пришлось подготовить для Министерства связи СССР обоснование необходимости издавать этот журнал на английском языке. Затем были решены технические проблемы издания журнала. На Международной книжной ярмарке в Москве (1989) я нашёл партнера по изданию и распространению журнала – издательство Шпрингер (Вена, Нью-Йорк). Для издания журнала были мобилизованы лучшие возможности Казани. Директор фирмы “Алгоритм” Альберт Шагенович Каприльянц с энтузиазмом поддержал нас. В декабре 1989 года вышел из печати пилотный выпуск “Applied Magnetic Resonance”. С 1990 по 1992 годы “Applied Magnetic Resonance” печатался в Казани. Начиная с 1993 года, мы готовили плёнки для печати и отправляли их в издательство Шпрингер (Вена). Начиная с 2007 года, мы представляли в издательство Шпрингер файлы журнала для размещения онлайн и печати: “Applied Magnetic Resonance” стал доступен в интернете! С 1 июня 2009 года журнал полностью перешёл на электронный ме-

неджмент через систему Editorial Manager (<http://apmr.edmgr.com/>). Интересную информацию о журнале можно найти на веб-сайте <http://www.authormapper.com/search.aspx?phr=journal:Applied%20Magnetic%20Resonance>.

В предисловии редактора к первому выпуску журнала я назвал два главных соображения в его пользу: “...Впечатляющее разнообразие приложений методов магнитного резонанса и их проникновение в новые области науки и технологии делает необходимым появление журнала, направленного на то, чтобы стимулировать распространение приложений магнитного резонанса. Не менее важно и то, что этот журнал будет служить мостом между учёными Востока и Запада ...”. Оглядываясь назад, могу сказать, что двадцать лет “Applied Magnetic Resonance” демонстрируют, что он нашёл свою нишу во всём многообразии журналов по магнитному резонансу и что вышеприведённые соображения сработали. Систематические статьи и специальные выпуски, посвящённые актуальным проблемам магнитного резонанса, раскрывают великое множество приложений магнитного резонанса в различных областях науки и технологии. За двадцать лет опубликовано 1824 статьи, написанные 4185 авторами из 59 стран: Германии, США, Японии, России, Польши, Италии, Великобритании, Франции, Швейцарии, Канады, Китая, Румынии, Австралии, Словении, Израиля, Аргентины, Швеции, Болгарии, Индии, Южной Кореи, Украины, Турции, Греции, Испании, Бельгии, Австрии, Венгрии, Новой Зеландии, Хорватии, Бразилии, Дании, Нидерландов, Норвегии, Молдовы, Словакии, Мексики, Чехии, Финляндии, Грузии, Литвы, Кубы, Сербии, Беларуси, Гонконга, Ирана, Казахстана, Саудовской Аравии, Бангладеш, Колумбии, Эстонии, Исландии, Ливана, Марокко, Португалии, Сингапура, Сирии, Тайваня, Таиланда и Вьетнама.

Журнал состоялся благодаря огромной поддержке всего международного научного сообщества. Трудно или даже невозможно назвать всех людей, которые много сделали для развития “Applied Magnetic Resonance”. Поэтому я ограничусь только именами Ульриха Хаберлена (Институт медицинских исследований, Хайдельберг, Германия) и Киса Р. Кардунера (компания Форд Мотор, Дирборн, США), первых помощников редактора, и Ляйли Васильевны Мосиной и Сергея Михайловича Ахмина, моих коллег по редакции в Казани. Я очень признателен за сотрудничество всем членам редакционных коллегий и гостевым редакторам спецвыпусков. Их имена можно найти на веб-сайте журнала: <http://www.springer.com/springerwiennewyork/physics/journal/723>.

Добро пожаловать!

К. М. Салихов
главный редактор “Applied Magnetic Resonance”

ВАЖНЕЙШИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ГОДА

Государственная премия Республики Татарстан

Указом Президента Республики Татарстан (№ УП-650 от 07.12.2009) Государственная премия РТ в области науки и техники 2009 года присуждена Самарцеву Виталию Владимировичу, доктору физико-математических наук, профессору, заведующему лабораторией нелинейной оптики Учреждения Российской академии наук Казанского физико-технического института им. Е. К. Завойского Казанского научного центра Российской академии наук за цикл работ “Когерентные и коллективные явления в нелинейной и квантовой оптике”.

Этот цикл работ был выдвинут на соискание Государственной премии РТ 2009 года Учёным советом КФТИ КазНЦ РАН и включает в себя написанные В. В. Самарцевым главы четырех монографий: “Оптическая эхоспектроскопия” (Москва: Наука 1984), “Когерентные явления в оптике” (Казань: Изд-во КГУ 2003), “Depolarizing Collisions in Nonlinear Electrodynamics” (Boca Raton, Arizona, USA: CRC Press 2004), “Оптика фемтосекундных лазеров” (Санкт-Петербург: Изд-во ИТМО 2007); и серию его оригинальных статей (из 39 наименований) по когерентным и коллективным явлениям в оптике. Представленный цикл работ нацелен на поиск и изучение новых свойств и характеристик этих оптических явлений, а также на их использование в оптической спектроскопии и информатике. При выдвижении цикла было отмечено, что входящие в него научные работы внесли существенный вклад в понимание физики и свойств когерентных и коллективных явлений (типа фотонного эха и сверхизлучения) в нелинейной и квантовой оптике, в развитие методов оптической когерентной и бифотонной спектроскопии, в разработку оптических процессоров на основе этих явлений. При этом подчеркивалось, что решение всех этих задач сопровождалось, как правило, оптическими экспериментами, а их результаты получили признание мирового научного сообщества. Выдвижение данного цикла работ поддержали: Научный совет РАН “Спектроскопия атомов и молекул”, Учёные советы 12 научных учреждений, центров и ведущих вузов России и Беларуси, среди которых: РНЦ “Курчатовский институт” и МЛЦ МГУ (Москва), СПГУ ИТМО и РГПУ



Президент Республики Татарстан М. Ш. Шаймиев и лауреат Государственной премии Республики Татарстан 2009 года В. В. Самарцев. Слева направо: В. В. Самарцев, М. Ш. Шаймиев.

(Санкт-Петербург), ИСАН (Троицк, Московская область), СамГУ и СФ ФИ РАН (Самара), ВГУ (Волгоград), ИФ и ИФТТ и ПП (Минск) и другие. При этом отмечалось, что в настоящее время заявленные монографии стали настольными книгами для специалистов, аспирантов, магистрантов и студентов, проводящих свои исследования в области нелинейной и квантовой оптики, а одна из них – “Оптическая эхоспектроскопия” – является первой в мировой научной литературе книгой, посвящённой одному из самых красивых и информативных оптических явлений – фотонному эху и спектроскопии на его основе. Эта книга даёт полное представление об оригинальном вкладе автора цикла в становление оптической эхоспектроскопии (в том числе фемтосекундной) и в современное состояние разработок оптических эхоспектраторов. Предложен и экспериментально реализован на ряде перспективных примесных кристаллов новый режим постановки оптических эхо-экспериментов (с использованием импульсов стоячих волн), получивший

название “обращённого режима”. Широкую известность в мире получили работы В. В. Самарцева с коллегами по изучению в кристаллах ван-флековских парамагнетиков (типа $\text{Pr}^{3+}:\text{LaF}_3$ и $\text{Tm}^{3+}:\text{YAG}$) долгоживущего стимулированного фотонного эха (ДСФЭ). Наиболее ярким экспериментом в этом направлении стал поставленный в КФТИ эхо-эксперимент по многократному считыванию кодированных сигналов ДСФЭ с одной и той же локальной области кристалла. Проведены фундаментальные научные исследования физических основ функционирования оптических запоминающих устройств на основе явления ДСФЭ. Экспериментально обнаружен эффект корреляции временной формы различных сигналов фотонного эха с формой импульса-кода. Он лёг в основу нескольких патентов по оптическим эхо-процессорам. В. В. Самарцеву принадлежат основополагающие работы не только в области оптической эхо-спектроскопии примесных кристаллов и аморфных сред, но и эхо-спектроскопия газов; например, оптической эхо-спектроскопии сверхзвуковых охлаждающих газовых струй или обнаружение (вместе с коллегами из МарГУ) нефарадеевского поворота вектора поляризации стимулированного фотонного эха в парах молекулярного йода. Кроме работ по фотонному эхо, были пред-

ставлены (вместе с харьковскими коллегами из ФТИНТ НАНУ) фундаментальные оптические эксперименты по поиску и обнаружению оптического сверхизлучения в твёрдотельном образце – кристалле дифенила с пиреном, а также триггерного оптического сверхизлучения в том же кристалле. Эти работы вошли в своё время в число важнейших достижений АН СССР и РАН. Заслуживают особого внимания и эксперименты по изучению оптического сверхизлучения, осуществлённые в КФТИ КазНЦ РАН на одном из кристаллов ван-флековских парамагнетиков (LaF_3). Важным научным результатом представленного цикла работ является экспериментальная реализация бифотонной оптической спектроскопии на примере исследования двух примесных кристаллов. Созданная аппаратура позволит в дальнейшем решать фундаментальные задачи квантовой оптики, включая проблемы создания оптической квантовой памяти. Все эти разработки проводятся в тесном сотрудничестве с российскими и зарубежными учёными. Автор цикла является организатором и председателем оргкомитетов международных симпозиумов по фотонному эхо и когерентной спектроскопии и международных чтений по квантовой оптике.

Международная премия им. Дж. Гиббонса Института инженеров электротехники и электроники (IEEE) за 2009 год

В 2009 году в США группе сотрудников института: И. Б. Хайбуллину (посмертно), Р. М. Баязитову, Р. И. Баталову, Я. В. Фаттахову и М. Ф. Галаяутдинову была присуждена Международная премия им. Дж. Гиббонса Института инженеров электротехники и электроники “за вклад в технологию лазерного отжига”.

Премия им. Дж. Гиббонса традиционно ежегодно вручается, начиная с 1993 года, на Международной конференции по передовым термическим обработкам полупроводников учёным и специалистам в области полупроводниковой микроэлектроники. Институт инженеров электротехники и электроники – Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE) – общественная некоммерческая ассоциация профессионалов, ведущая историю с 1884 года. Награда связана с именем проф. Джеймса Гиббонса, внёсшего большой вклад в применение диффузионных технологий и ионной имплантации для создания твёрдотельных приборов. Его имя занесено в экспозицию Зала славы Силиконовой долины. До 2009 года награда вручалась учёным и представителям микроэлектронных корпораций США, Западной Европы, Японии. Впервые этой награды удостоены российские учёные.

Научное направление импульсной модификации твёрдых тел было заложено в Казанском физико-техническом

институте в 1973–1974 гг. в результате сотрудничества групп когерентной оптики и ионной имплантации. Обнаруженное явление быстрой импульсной кристаллизации твёрдых тел и уникальные возможности предложенного



Диплом Международной премии им. Дж. Гиббонса Института инженеров электротехники и электроники (IEEE), вручённый группе сотрудников КФТИ КазНЦ РАН.

метода лазерного отжига послужили быстрому развитию направления импульсных обработок полупроводников во всём мире. Широкое применение импульсно-световых методов в технологии полупроводниковой микроэлектроники началось с 1977 года, после проведения в США 1-го Американско-советского семинара по ионной имплантации, где были представлены доклады по лазерному отжигу полупроводников учёными из Казани и Новосибирска. В 1988 году за открытие физического явления быстрой ориентированной кристаллизации твёрдых тел (лазерный отжиг) И. Б. Хайбуллину, Е. И. Штыркову, М. М. Зарипову, М. Ф. Галаяутдинову и Р. М. Баязитову, а также сотрудникам академических институтов страны Л. С. Смирнову, Л. Н. Александрову, Г. А. Качурину, А. В. Двуреченскому (ИФП СО АН СССР), Ю. В. Ковальчуку, Ю. В. Погорельскому (ФТИ АН СССР), Ю. В. Копаеву (ФИАН СССР) была присуждена Государственная премия СССР.

Технологическое внедрение импульсно-световых методов как в России, так и за рубежом было обусловлено тенденцией микроэлектроники к уменьшению размеров элементов микросхем, а также уменьшению степени их дефектности. При этом импульсные методы, в отличие от ранее применяемых длительных термообработок, позволили свести к минимуму диффузионное уширение элементов с одновременным улучшением их электрических свойств. Приоритетные работы казанских учёных в области лазерного отжига хорошо известны и признаны во всём мире.



Церемония вручения награды (Олбани, Нью-Йорк, США, 2009 г.). Слева направо: Джефф Гепли (Jeff Gepley, Mattson Technology), Рустэм Баязитов (КФТИ КазНЦ РАН), Бо Лоджек (Bo Logek, ATMEL Corporation).

Оргкомитетом конференции IEEE-RTP 2009 (www.ieee-rtp.org/awards.html) заведующий лабораторией Рустэм Махмудович Баязитов был приглашён для представления последних результатов исследований, истории развития лазерного отжига в России, а также для участия в церемонии вручения награды. Весьма символично, что вручение награды проходило в том же месте (Олбани, штат Нью-Йорк, США), где около тридцати лет назад Ильдусом Бариевичем Хайбуллиным было сделано сообщение о российском открытии.

Важнейшие результаты фундаментальных исследований, рекомендованные Учёным советом КФТИ КазНЦ РАН в отчёт РАН за 2009 год

1.

*Впервые наблюдался эффект спинового экранирования в сверхпроводящем состоянии трёхслойных плёнок $Ni/V/Ni$ и $Pd_{1-x}Fe_x/V/Pd_{1-x}Fe_x$. Этот новый эффект для слоистых тонкоплёночных систем сверхпроводник/ферромагнетик был предсказан Ф. Бержеретом и др. (Bergeret F.S., Volkov A.F., Efetov K.B.: Europhys. Lett. **66**, 111 (2004)). Изучены его зависимости от толщины слоя ванадия и от направления магнитного поля. Получено удовлетворительное согласие между экспериментом и теорией.*

Аннотация. С помощью метода ядерного магнитного резонанса ядер ^{51}V в сверхпроводящем состоянии трёхслойных плёнок $Ni/V/Ni$ и $Pd_{1-x}Fe_x/V/Pd_{1-x}Fe_x$, впервые наблюдался эффект спинового экранирования. Этот новый эффект для слоистых тонкоплёночных гетероструктур сверхпроводник/ферромагнетик, который означает формирование спиновой поляризации в сверхпроводящем слое образцов за счёт сверхпроводящих корреляций с поляризованными электронами в ферромагнитном слое, был предсказан теоретически Ф. Бержеретом и др. (Bergeret F.S., Volkov A.F., Efetov K.B.: Europhys. Lett. **66**,

111 (2004); Bergeret F.S., Volkov A.F., Efetov K.B.: Phys. Rev. B **69**, 174504 (2004)). Проведены исследования этого эффекта в зависимости от толщины сверхпроводящего слоя ванадия и направления магнитного поля по отношению к плоскости образца [3]. Для параллельной геометрии, которую в силу технических сложностей трудно осуществить, реализуется безвихревое состояние образца. Условия наблюдения сигналов ЯМР в этом состоянии позволяют провести их прямое количественное сравнение с теоретической моделью. Получено удовлетворительное согласие между экспериментом и теорией эффекта спинового экранирования в слоистых гетероструктурах сверхпроводник/ферромагнетик. Анализ показывает, что эффект проникновения ферромагнетизма в сверхпроводник не может препятствовать нормальной работе спинового клапана.

Лаборатория физики перспективных материалов КФТИ КазНЦ РАН.

Руководитель: Гарифуллин И.А.

Отв. исполнители: Гарифуллин И.А., Салихов Р.И., Гарифьянов Н.Н. (КФТИ КазНЦ РАН); Тагиров Л.Р. (КГУ); Тейз-Брёл К., Вестерхолт К., Цабель Х. (Институт экспериментальной физики и физики твёрдого тела г. Бохума, Германия).

Публикации:

1. Salikhov R.I., Garifullin I.A., Garif'yanov N.N., Tagirov L.R., Theis-Bröhl K., Westerholt K., Zabel H.: Experimental observation of the spin screening effect in superconductor/ferromagnet thin film heterostructures. Phys. Rev. Lett. **102**, 087003(1-4) (2009)
2. Гарифуллин И.А., Гарифьянов Н.Н., Салихов Р.И., Тагиров Л.Р.: Экспериментальное наблюдение эффекта спинового экранирования в тонкоплёночных гетероструктурах сверхпроводник/ферромагнетик. Изв. РАН. Сер. физ. **74**, 19–22 (2010)
3. Salikhov R.I., Garif'yanov N.N., Garifullin I.A., Tagirov L.R., Westerholt K., Zabel H.: Study of the spin screening effect in superconductor/ferromagnet thin film heterostructures by nuclear magnetic resonance. Phys. Rev. B **80**, iss. 21, 214523(1-8) (2009)

2.

Впервые при комнатной температуре экспериментально реализовано спектральное кодирование информации в процессе фемтосекундного эхо-процессинга в плёнке поливинилбутираля, легированной молекулами фталоцианина.

Аннотация. Предыдущие аналогичные фемтосекундные эхо-эксперименты были выполнены лишь при температуре жидкого гелия. Длительность возбуждающих фемтосекундных импульсов составляла 60 фс, а рабочая длина волны – 793 нм. Однородная ширина S0-S1-линии была равна 89 см⁻¹, а неоднородная ширина – 370 см⁻¹.

Лаборатория быстропротекающих молекулярных процессов и лаборатория нелинейной оптики КФТИ КазНЦ РАН.

Руководители: Лобков В.С., Самарцев В.В.

Отв. исполнители: Сафиуллин Г.М., Леонтьев А.В., Никифоров В.Г.

Публикации:

1. Safiullin G.M., Nikiforov V.G., Lobkov V.S., Samartsev V.V., Leontiev A.V.: Femtosecond echo-processing in a dye-doped polymer film at room temperature. Laser Phys. Lett. **6**, no. 10, 746–752 (2009)

3.

Впервые наблюден фазовый переход из ферромагнитного в парамагнитное состояние в баллистических наноконтактах Ni при протекании через них тока высокой плотности. Предложена теоретическая модель, основанная на зависимости времени энергетической релаксации от приложенной разности потенциалов. Из сравнения расчётных и экспериментальных данных найдено значение транспортной длины свободного пробега электронов для Ni и определены диаметры полученных наноконтактов.

Аннотация. В работе исследовался электронный транспорт в наноконтактах (НК) Ni, полученных электрохимическим методом при комнатной температуре. Для сформированных НК зарегистрирован сильный рост сопротивления с увеличением приложенного напряжения. На экспериментальных спектрах первой производной сопротивления НК по напряжению от приложенной разности потенциалов имеется максимум. С уменьшением диаметра НК максимум смещается в сторону больших напряжений. Обнаруженный максимум связывается с локальным фазовым переходом области контакта из ферромагнитного в парамагнитное состояние. После перехода области НК Ni в парамагнитное состояние с увеличением температуры продолжает увеличиваться только вклад рассеяния электронов на фононах, а рассеяние электронов на магнонах перестаёт зависеть от дальнейшего нагрева, поэтому изменяется скорость роста сопротивления при достижении определённого значения напряжения. Предложенная теоретическая модель, основанная на явной зависимости размера области, где электроны теряют избыточную энергию от приложенного напряжения, подтвердила, что обнаруженный максимум связан с локальным фазовым переходом в области контакта. Из сравнения расчётных и экспериментальных данных найдено значение транспортной длины свободного пробега электронов для Ni и определены диаметры полученных НК. Исследована зависимость температуры НК от приложенного напряжения.

Лаборатория физики и химии поверхности и лаборатория нелинейной оптики КФТИ КазНЦ РАН.

Руководитель: Бухараев А.А.

Отв. исполнители: Лисин В.Н., Гатиятов Р.Г.

Публикации:

1. Гатиятов Р.Г., Лисин В.Н., Бухараев А.А.: Нелинейный транспорт электронов в наноконтактах металлов при комнатной температуре. Сб. тез. Второго междунар. конкурса науч. работ молодых учёных в области нанотехнологий, 6–8 октября 2009, с. 30–32. Москва 2009.
2. Gatiyatov R.G., Bukharaev A.A.: Volt-ampere characteristics of magnetic nickel nanocontacts under high-density currents. Abstr. Int. Symposium “Spin Waves 2009”, June 7–12, 2009, p. 19. St. Petersburg 2009.

4.

Установлена возможность управления оптическими свойствами композиционного материала путём модификации дисперсных параметров имплантированных металлических наночастиц с помощью мощного лазерного облучения.

Аннотация. Впервые установлено, что воздействие излучения ультрафиолетового (эксимерного) лазера наносекундной длительности на диэлектрики (натриево-кальциевое силикатное стекло, SiO_2 , Al_2O_3), содержащие ионно-синтезированные металлические наночастицы, приводит к изменению их размеров и распределения по размерам, а, следовательно, и к модификации оптических свойств композиционных метаматериалов. Показано, что наблюдаемые эффекты определяются существенным нагревом имплантированного слоя стекла и металлических наночастиц при лазерном отжиге и связанным с этим плавлением наночастиц. Дополнительный термический отжиг лазерно-отожжённых слоёв ведёт к сужению функции распределения металлических наночастиц по размерам, что вызывает усиление плазмонного поглощения в композиционном метаматериале. Наблюдаемые эффекты представляют практический интерес и могут быть использованы при создании нелинейно-оптических устройств с ультракороткими временами отклика таких, как оптические ограничители, служащие для защиты глаз, оптических детекторов и сенсоров различного назначения от интенсивного лазерного воздействия.

Лаборатория радиационной физики КФТИ КазНЦ РАН.
Руководители: Степанов А.Л., Файзрахманов И.А.

Отв. исполнители: Нуждин В.И., Валеев В.Ф., Базаров В.В.

Публикации:

1. Stepanov A.L.: Laser annealing of composite materials with metal nanoparticles, chapt. 2. “High-power and femtosecond lasers” (Barret P.-H., Palmer M., eds.), pp. 27–70. New York: NOVA Sci. Publ. 2009.
2. Степанов А.Л., Валеев В.Ф., Нуждин В.И., Файзрахманов И.А.: Лазерный отжиг кварцевого стекла с ионно-синтезированными наночастицами меди. ФТТ 51, вып. 9, 1801–1807 (2009)

3. Степанов А.Л., Валеев В.Ф., Нуждин В.И., Базаров В.В., Файзрахманов И.А.: Отжиг эксимерным лазером силикатного стекла с ионно-синтезированными наночастицами серебра. ЖТФ 79, вып. 10, 102–109 (2009)

5.

Установлен вклад собственного поглощения кремния и генерированной электронно-дырочной плазмы в процессы наносекундного лазерного отжига. На основе полученных данных развит метод лазерных обработок с температурно-управляемым поглощением кремниевых структур, позволяющий синтезировать нанокристаллические соединения без нарушения поверхности.

Аннотация. Для решения дискуссионного вопроса о роли электронно-дырочной плазмы при лазерной обработке полупроводников проводилось оптическое зондирование излучением с длиной волны вблизи края собственного поглощения кремния. Впервые для повышения чувствительности эксперимента зондирующее излучение направлялось и регистрировалось под углом полного внутреннего отражения света. Установлено, что при типовых условиях лазерного отжига ($\lambda = 0.69$ мкм, $t \sim 10^{-8}$ с) тонкоплёночных структур (имплантированных слоёв) концентрация электронно-дырочных пар в кристалле достигает значения $2 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$, а время их рекомбинации, определяемое Оже-процессами, не превышает длительности импульса. При данных параметрах плазмы не наблюдается сдвига температурных точек фазовых переходов. Установлена также температурная зависимость коэффициента собственного поглощения света вблизи фундаментального края кремния в диапазоне высоких температур (>500 К). Полученные данные использованы для моделирования и развития предложенного нами метода лазерного отжига с температурно-управляемой прозрачностью кристалла. При этом лазерное излучение ($\lambda = 1.06$ мкм) направляется с обратной стороны охлаждаемой кремниевой тонкоплёночной структуры. Фотогенерированная в кристалле электронно-дырочная плазма служит в качестве нелинейного фильтра, повышая равномерность поглощения излучения вблизи поверхности и предотвращая её нарушение. Метод позволил синтезировать слои нанокристаллических полупроводниковых соединений для кремниевой оптоэлектроники (например, силициды железа и хрома). При этом, в отличие от традиционных лазерных обработок, не наблюдается нарушение поверхности тонкоплёночной структуры, а синтезируемые соединения обладают приемлемой для планарной технологии морфологией поверхности.

Лаборатория интенсивных радиационных воздействий КФТИ КазНЦ РАН.

Руководитель: Баязитов Р.М.

Исполнители: Баталов Р.И., Галяутдинов М.Ф. (КФТИ КазНЦ РАН), Ивлёв Г.Д., Гацкевич Е.И. (ИФ НАНБ).

Публикации:

1. Ivlev G.D., Gatzkevich E.I., Bayazitov R.M., Batalov R.I., Khaibullin I.B.: Dynamics of photo-ionization, heating and crystallization of implanted silicon during laser annealing. Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B **257**, 208–211 (2007)
2. Баязитов Р.М.: Фотовозбуждение и нагрев при лазерной обработке кремниевых структур. Материалы VI Междунар. науч. конф. и IV школы-конф. молодых учёных “Радиационно-термические эффекты и процессы в неорганических материалах” (Суржиков А.П., отв. ред.). Физика **51**, № 11/2, с. 212–218. Томск: ТомГУ 2008.
3. Bayazitov R.M.: Heating and photoionization of silicon structures at laser treatments. Proc. 17 IEEE Int. Conf. on Advanced Thermal Processing of Semiconductors (RTP 2009), pp. 109–112. Piscataway, NJ: IEEE 2009.

6.

Предложена и апробирована оригинальная дифракционная методика динамической термометрии и исследования быстрых структурных и фазовых переходов на поверхности полупроводников при импульсном нагреве.

Аннотация. Данная методика основана на регистрации динамики дифракционной картины Фраунгофера от двух измерительных дифракционных решёток, созданных на поверхности полупроводника ионной имплантацией и фотолитографией. Методика позволяет с высоким временным разрешением исследовать структурные и фазовые переходы в ионно-легированных слоях полупроводников, такие как твёрдофазная рекристаллизация и плавление. Одновременно производится бесконтактное измерение температуры образца в процессе импульсного светового отжига.

Лаборатория методов медицинской физики и лаборатория быстропротекающих молекулярных процессов КФТИ КазНЦ РАН.

Руководитель: Фаттахов Я.В.

Отв. исполнитель: Галаяутдинов М.Ф.

Публикации:

1. Fattakhov Ya.V., Galyautdinov M.F., L`vova T.N., Zakharov M.V., Khaibullin I.B.: Investigation of structural-phase transitions dynamics on the surface of implanted silicon at rapid thermal processing. Nucl. Instr. Meth. Phys. B **257**, iss. 1-2, 222–226 (2007)
2. Галаяутдинов М.Ф., Фаррахов Б.Ф., Фаттахов Я.В., Захаров М.В.: Динамическая термометрия твёрдого тела методом оптической дифракции при импульсном облучении. Оптика и спектроскопия **107**, № 4, 675–679 (2009)
3. Галаяутдинов М.Ф., Фаррахов Б.Ф., Фаттахов Я.В., Захаров М.В.: Развитие методики лазерной диагностики твёрдых тел при импульсном световом облучении. Приборы и техника эксперимента (2010), принята в печать.

Важнейшие законченные исследования и разработки, готовые к практическому применению

Разработана методика математического моделирования, проведены расчётные исследования и обоснованы направления модернизации кабины грузовых автомобилей семейства КамАЗ по условиям пассивной безопасности конструкции.

Лаборатория моделирования физико-механических процессов и систем КФТИ КазНЦ РАН.

Руководитель: Черников С.К.

Отв. исполнитель: Файзуллин А.М.

Итоги конкурса научных работ сотрудников КФТИ 2009 года

В рамках ежегодной итоговой научной конференции КазНЦ РАН был проведён конкурс научных работ КФТИ за 2009 год.

Члены Учёного совета отобрали из 69 докладов, представленных на стендовой сессии, 19 докладов для участия в устной сессии.

По итогам конкурса 2009 года присуждены одна первая, одна вторая и две третьих премии:

1-е место

Гатиятов Р.Г., Лисин В.Н., Бухараев А.А.: Фазовый переход в магнитных наноконтактах никеля, индуцированный током высокой плотности

2-е место

Калачёв А.А.: Преобразование однофотонных волновых пакетов в устройствах квантовой памяти на основе перестраиваемых резонаторов

3-е место

- Салихов К.М.: Вклад обменного и диполь-дипольного взаимодействий в форму спектров ЭПР растворов нитроксильных радикалов
- Вишневская Г.П., Овчинников И.В., Фролова Е.Н.: Температурные зависимости параметров спектров ЭПР спин-переменных комплексов Fe(III) в ионообменном полимере

В рамках традиционной ежегодной конференции молодых учёных КФТИ КазНЦ РАН был проведён конкурс научных работ за 2009 год.

Конкурсная комиссия в составе: Петухов В.Ю., Таланов Ю.И., Лисин В.Н. по итогам устной сессии секции молодых учёных и аспирантов присудила следующие призовые места:

1-е место

Гатиятов Р.Г.: Баллистический и диффузный режимы транспорта электронов в наноконтактах магнетиков

2-е место

Суханов А.А.: ЭПР четырёхъядерных кластеров $[\text{Fe}_2^{\text{III}}\text{Ln}_2^{\text{III}}(\mu_3\text{-OH})_2(\text{teaH})_2(\text{O}_2\text{CCPh})_6] \cdot 3\text{MeCN}$ {Ln = Y^{3+} , Gd^{3+} , Dy^{3+} , Nd^{3+} }

3-е место

Шарипов К.Р.: Исследование свойств керамики $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Mn}_{0.925}\text{Zn}_{0.075}\text{O}_3$ ($x = 0.075; 0.095; 0.115$) методом ЭПР

Конкурсная комиссия в составе: Петухов В.Ю., Таланов Ю.И., Лисин В.Н. по итогам устной сессии секции студентов присудила следующие призовые места:

1-е место

Александров А.С.: ЯМР Q-метр с протяжкой и модуляцией частоты

2-е место

Клековкина В.В.: Сверхтонкие поля на примесных центрах переходных металлов в кристалле никеля: *ab initio* расчёты в приближении KKR-CPA

3-е место

Куржунов Д.В.: Фотоиндуцированные центры в кристалле $\text{KTa}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ ($x = 0.012$): ЭПР-исследование

Обнаружение и исследование эффекта спинового экранирования в слоистых тонкоплёночных системах сверхпроводник/ферромагнетик методом ядерного магнитного резонанса

И. А. Гарифуллин, Н. Н. Гарифьянов, Р. И. Салихов

Лаборатория физики перспективных материалов

С помощью метода ядерного магнитного резонанса ядер ^{51}V в сверхпроводящем состоянии трёхслойных плёнок $\text{Ni}/\text{V}/\text{Ni}$ и $\text{Pd}_{1-x}\text{Fe}_x/\text{V}/\text{Pd}_{1-x}\text{Fe}_x$ впервые наблюдался эффект спинового экранирования. Этот новый эффект для слоистых тонкоплёночных структур сверхпроводник/ферромагнетик, который означает формирование спиновой поляризации в сверхпроводящем слое образцов за счёт сверхпроводящих корреляций с поляризованными электронами в ферромагнитном слое, был предсказан теоретически Ф. Бержеретом и др. (Bergeret F.S., Volkov A.F., Efetov K.B.: Phys. Rev. B **69**, 174504(1-4) (2004)). Проведены детальные исследования этого эффекта, изучая его зависимости от толщины сверхпроводящего слоя ванадия и от направления магнитного поля по отношению к плоскости образца. Для параллельной геометрии, которую в силу технических сложностей трудно осуществить, реализуется безвихревое состояние образца. Последнее позволяет провести прямое количественное сравнение экспериментальных результатов с теоретической моделью. Получено удовлетворительное согласие между экспериментом и теорией эффекта спинового экранирования в слоистых гетероструктурах сверхпроводник/ферромагнетик.

Введение

Взаимодействие сверхпроводимости и ферромагнетизма в тонкоплёночных слоистых гетероструктурах сверхпроводник/ферромагнетик (С/Ф) остаётся в центре внимания физиков на протяжении уже двух десятилетий [1–5]. Интерес к этим системам продиктован богатым разнообразием явлений, которые возникают при таком соседстве двух взаимоисключающих состояний вещества, а также возможностью их применения при создании ключей для сверхпроводящего тока (см., например, [6] и ссылки в этой работе). Взаимоисключающими явления сверхпроводимости и ферромагнетизма оказываются вследствие того, что обменное взаимодействие в ферромагнетике способствует параллельной взаимной ориентации электронных спинов, в то время как сверхпроводимость возникает за счёт образования куперовских пар, то есть за счёт спаривания электронов с антипараллельными спинами. Было установлено, что при контакте сверхпроводящей плёнки с ферромагнитной (эффект близости С/Ф) происходит сильное подавление

температуры сверхпроводящего перехода T_c . Вместе с тем было обнаружено, что T_c может проявлять осцилляционную зависимость от толщины ферромагнитного слоя. В настоящее время эти явления достаточно хорошо поняты. Они связаны с проникновением сверхпроводящего порядка в ферромагнитный слой (см., например, [7, 8]). Поскольку энергия магнитного упорядочения в элементарных ферромагнетиках (таких, как Fe, Co и Ni) на несколько порядков выше, чем энергия образования куперовской пары в обычных “низкотемпературных” сверхпроводниках, то глубина проникновения сверхпроводящего порядка в Ф-слой ξ_F очень мала и, например, в случае железа составляет всего около 1 нм.

Несмотря на интенсивные в последние годы исследования систем С/Ф, некоторые вопросы фундаментального характера по-прежнему остаются открытыми. Например, что происходит с электронной системой С-слоя при контакте с Ф-слоем? Группа теоретиков под руководством проф. К. Б. Ефетова теоретически показала [9], что в С-слое в системе С/Ф за счёт сверхпроводящих корреляций может возникнуть магнитное упорядоче-

ние, которое проникает в С-слой на микроскопически большую глубину, порядка величины сверхпроводящей длины когерентности ξ_s или размера куперовской пары. При этом направление поляризации магнитного порядка должно быть противоположно направлению поляризации электронов проводимости в Ф-слое. Таким образом, не только сверхпроводящий порядок проникает в Ф-слой, но и магнитное упорядочение может возникать в С-слое. Этот эффект называется обратным эффектом близости или, по-другому, эффектом спинового экранирования.

Причину того, почему магнитный порядок может проникнуть в сверхпроводник, можно легко понять на качественном уровне. Предположим, что толщина Ф-слоя мала, меньше, чем глубина ξ_F , и допустим, что куперовские пары являются жёсткими объектами с противоположно направленными спинами электронов. Очевидно, что пары, полностью находящиеся в сверхпроводнике, не дают вклада в магнитный момент сверхпроводника. В то же время существуют пары, расположенные в пространстве более сложным образом, в которых один электрон находится в С-слое, а другой – в Ф-слое. Именно такие пары дают вклад в магнитный момент сверхпроводника. Направление вдоль магнитного момента M в ферромагнетике является предпочтительным для электрона пары, расположенного в Ф-слое. Данное обстоятельство вынуждает спин другого электрона куперовской пары, расположенного в С-слое, быть противоположным M . Это означает, что все такие пары дают вклад в магнитный момент сверхпроводника. При этом направление намагничённости электронов в этой области противоположно направлению магнитного момента M в ферромагнетике. Теоретически при малой толщине ферромагнитной плёнки (тоньше, чем ξ_F) индуцированный магнитный момент в сверхпроводнике должен полностью компенсировать магнитный момент электронов проводимости в Ф-слое. В связи с этим обратный эффект близости также называют эффектом спинового экранирования.

В данной работе нам впервые удалось экспериментально обнаружить эффект спинового экранирования в тонкоплёночных слоистых структурах Ф/С/Ф и исследовать особенности его проявления в этих системах.

По предварительным оценкам величина эффекта очень мала и необходимы высокочувствительные методы, способные обнаружить малые изменения поляризации электронов проводимости в С-слое. Спектроскопия низкоэнергетических мюонов μSR позволяет измерить профиль локальных полей в сверхпроводящей плёнке вблизи поверхности [10]. Мы обсуждали схему эксперимента, в котором пучок мюонов подавался бы через Ф-слой в сверхпроводник в двухслойных плёнках С/Ф. Однако возможности и доступность этого метода сильно ограничены. Это связано с тем, что амплитуда намагничённости, индуцированной вследствие эффекта спинового экранирования в С-слое, ожидается очень малой, в особенности, если принять во внимание ограниченную прозрачность границы раздела С/Ф для электронов,

образующих куперовские пары. Таким образом, был необходим экспериментальный метод с очень высокой чувствительностью к малым изменениям спиновой поляризации в С-слое. Таким методом, на наш взгляд, мог явиться ядерный магнитный резонанс (ЯМР). Сигнал ЯМР в металле за счёт контактного взаимодействия ядер с электронами проводимости оказывается смещённым на величину так называемого сдвига Найта. Вследствие этого, индуцированная эффектом спинового экранирования поляризация в сверхпроводнике должна смещать локальные резонансные поля для ядерных спинов в С-слое, расположенных в пределах расстояния порядка ξ_s от границы раздела С/Ф. Неоднородное распределение локальных полей, возникающее вблизи границы раздела С/Ф, будет характерным образом искажать форму линии ЯМР. Для того, чтобы зафиксировать экспериментально спиновую поляризацию, возникающую вследствие эффекта спинового экранирования, необходимо, чтобы толщина С-слоя несильно превышала длину когерентности сверхпроводника, в пределах которой эта поляризация и возникает. Это, в свою очередь, означает, что число ядер, вовлечённых в резонанс, будет чрезвычайно малым и необходимы высокочувствительные методы регистрации. Требование высокой чувствительности было удовлетворено созданием уникального спектрометра ЯМР.

Спектрометр ЯМР

Обычно для увеличения чувствительности спектрометра ЯМР используют импульсные спектрометры, функционирующие на максимально возможных частотах и позволяющие накапливать сигнал неограниченное число раз. Однако в нашем случае резонансное поле должно позволять проводить измерения ЯМР и в сверхпроводящем состоянии, а это приводит к существенному ограничению рабочей частоты спектрометра. Для того, чтобы преодолеть эту проблему, нами был создан сверхчувствительный спектрометр ЯМР, работающий в непрерывном режиме на частоте порядка 5 МГц. Для ядер ^{51}V резонансное поле оказывается порядка 5 кЭ, что позволяет проводить измерения и в сверхпроводящем состоянии.

Спектрометр основан на схеме генератора Робинсона [11]. Полевые транзисторы на основе GaAs, способные работать при температуре 4 К, позволили поместить высокочастотный генератор в жидкий гелий в непосредственной близости от резонансного контура. Это приводит к сильному уменьшению тепловых шумов и исключает потери в линии, соединяющей генератор с резонансным контуром. Вследствие того, что гиромагнитные отношения для ядер меди и ванадия близки, резонансный контур так же, как и модуляционные катушки, были намотаны серебряной проволокой высокой чистоты. При температуре жидкого гелия резонансный контур имеет высокую добротность, что также сильно увеличивает чувствительность спектрометра. Выход генератора был подключён к усилителю с синхронным детектированием.

Приготовление образцов

Для измерений ЯМР были приготовлены тонкоплёночные трёхслойные образцы Ф/С/Ф. В работе [12] мы показали, что наиболее подходящим сверхпроводником для наших исследований является V. В качестве Ф-слоёв мы использовали Ni или сплавы Pd с Fe. Были изготовлены тонкоплёночные образцы одиночного V, два образца Ni/V/Ni с различной толщиной ванадия и два образца $\text{Pd}_{1-x}\text{Fe}_x/\text{V}/\text{Pd}_{1-x}\text{Fe}_x$ с различной концентрацией Fe. Образцы готовились на установке молекулярно-лучевой эпитаксии. В качестве подложки использовался монокристаллический $\text{MgO}(001)$ с шероховатостью поверхности менее 0.1 нм. Плёнки V, Ni и Pd напылялись с помощью электронно-лучевой пушки со скоростями 0.15, 0.03 и 0.05 нм/с, соответственно. Сплав $\text{Pd}_{1-x}\text{Fe}_x$ создавался при одновременном испарении палладия и железа. Значение x задавалось соотношением скоростей напыления палладия и железа. Концентрации железа в полученных сплавах уточнялись по зависимости температуры Кюри как функции концентрации железа. Температура Кюри определялась из температурной зависимости намагниченности слоёв $\text{Pd}_{1-x}\text{Fe}_x$, измеряемой на SQUID-магнитометре. Мы оценили концентрацию железа в сплавах у двух образцов как 2 и 3 ат.%. На конечном этапе приготовления все образцы покрывались защитным слоем палладия толщиной примерно 3.5 нм. Толщины полученных слоёв и качество границ раздела С/Ф определялись методом малоуглового рассеяния рентгеновского излучения. Температуры сверхпроводящих переходов T_c , остаточное электросопротивление и верхние критические магнитные поля H_{c2} плёнок ванадия в наших образцах измерялись по изменению электросопротивления на постоянном токе с использованием стандартной четырёхконтактной методики в криостате с откачкой паров ^4He . Значение T_c определялось по середине сверхпроводящего перехода, ширина которого не превышала 0.1 К для всех образцов. Из значения отношения электросопротивления при комнатной температуре $R(300\text{ К})$ к электросопротивлению вблизи T_c $R(5\text{ К})$ $RRR = R(300\text{ К})/R(5\text{ К}) = \rho(300\text{ К})/\rho(5\text{ К})$, зная табличное значение удельного электросопротивления ванадия ($\rho(300\text{ К}) = 18.2\text{ мОм}\cdot\text{см}$), мы определили остаточное удельное электросопротивление $\rho(5\text{ К})$. Следуя работе Л. Лазар и др. [7], из соотношений А. Б.

Пиппарда [13] мы оценили величины длины свободного пробега l и сверхпроводящей длины когерентности ξ_s для всех образцов. Все измеренные и вычисленные нами величины приведены в таблице 1.

Экспериментальные результаты

Измерения ЯМР на ядрах ^{51}V проводились в температурном диапазоне 1.4–5.2 К. Поскольку для различных образцов рабочая частота несколько отличалась, для прямого сравнения положения резонансных линий все данные были пересчитаны к одной частоте радиочастотного поля, в данном случае к $\nu = 5542.3\text{ кГц}$.

Нормальное состояние

На рис. 1а показаны сигналы поглощения ЯМР от однослойной плёнки ванадия в нормальном состоянии в параллельной и перпендикулярной ориентациях плоскости образца относительно внешнего магнитного поля. В обоих случаях форма резонансной линии достаточно хорошо описывается линией поглощения гауссовой формы (кружками показаны рассчитанные спектры). Ширина линии равна $\Delta H = 11.2\text{ Э}$. Величина резонансного поля составила $H_0 = 4923.1\text{ Э}$. Таким образом, сдвиг линии ЯМР в сторону меньших полей относительно положения линии в диэлектриках (4952.2 Э для ^{51}V) составил $\delta H = 29.1\text{ Э}$, и сдвиг Найта оказался равным $K = 0.59\%$. Такая величина сдвига Найта в пределах точности эксперимента хорошо совпадает с ранее измеренным сдвигом в работах [12, 14].

На рис. 2а приведены спектры ЯМР для трёхслойного образца Ni/V/Ni с толщиной ванадия 44 нм в нормальном состоянии для двух ориентаций относительно внешнего магнитного поля. В параллельной ориентации спектр ЯМР полностью идентичен спектру от однослойного ванадия. В перпендикулярной ориентации наблюдается небольшое искажение формы и смещение резонансной линии в сторону меньших магнитных полей. Это вызвано возникновением дипольного поля от Ф-слоёв, так как размагничивающее поле Ф-слоя в перпендикулярной ориентации в отличие от параллельной не равно нулю.

Таблица 1. Экспериментальные параметры изучаемых образцов. В таблице приведены толщина d_v и шероховатость β ванадиевого слоя, температура сверхпроводящего перехода T_c , отношение электросопротивлений RRR , длина свободного пробега электронов проводимости l и сверхпроводящая длина когерентности ξ_s . Толщины Ф-слоёв у всех трёхслойных образцов равны $d_F = 3\text{ нм}$.

Образец	d_v (нм)	β (нм)	T_c (К)	RRR	l (нм)	ξ_s (нм)
V	30	0.3	4.65	11	15	14
$\text{Pd}_{0.98}\text{Fe}_{0.02}/\text{V}/\text{Pd}_{0.98}\text{Fe}_{0.02}$	36	1.3	3.02	4.6	5	8
$\text{Pd}_{0.97}\text{Fe}_{0.03}/\text{V}/\text{Pd}_{0.97}\text{Fe}_{0.03}$	42	1.3	3.55	6	7	10
Ni/V/Ni	44	1.6	4.05	4.4	5	8
Ni/V/Ni*	70	0.8	4.4	8.2	10	11

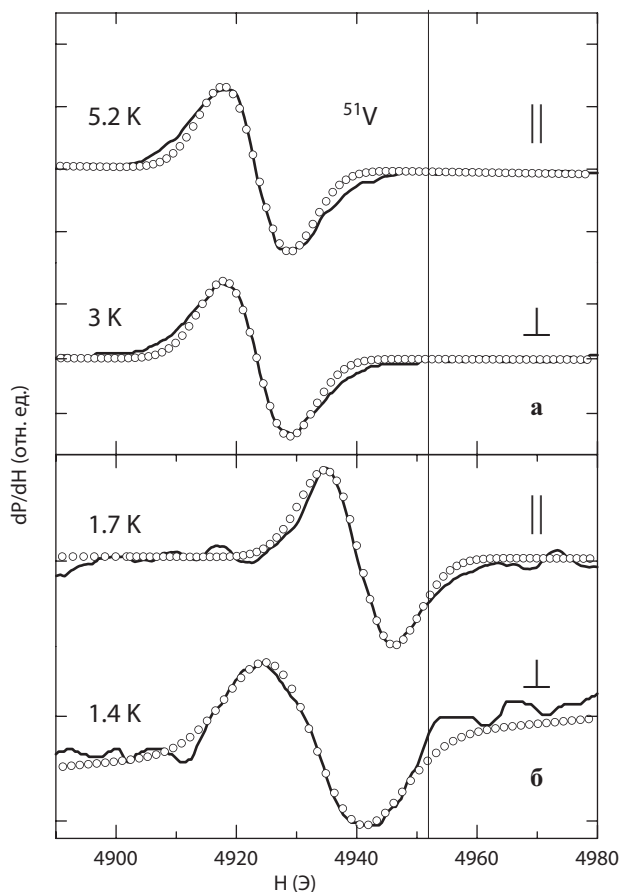


Рис. 1. Спектры ЯМР одиночной плёнки ванадия в нормальном (а) и сверхпроводящем (б) состояниях при параллельной (||) и перпендикулярной (⊥) ориентациях плоскости образца относительно направления внешнего магнитного поля. Крестиками показаны результаты подгонки производной линией поглощения гауссовой формы. Сплошной вертикальной линией показано положение линии ЯМР ядер ^{51}V в диэлектриках.

На рис. 3 показаны сигналы ЯМР для трёхслойных образцов $\text{Pd}_{0.98}\text{Fe}_{0.02}/\text{V}/\text{Pd}_{0.98}\text{Fe}_{0.02}$ (рис. 3а) и $\text{Pd}_{0.97}\text{Fe}_{0.03}/\text{V}/\text{Pd}_{0.97}\text{Fe}_{0.03}$ (рис. 3б) в перпендикулярной ориентации плоскости образца относительно внешнего магнитного поля в нормальном (при $T = 2.7$ К) состоянии. Спектры достаточно хорошо описываются симметричной линией поглощения гауссовой формы и полностью идентичны спектрам ЯМР от одиночной плёнки ванадия. Отсутствие искажений, вызванных размагничивающим полем в перпендикулярной ориентации, связано с тем, что намагниченность таких сильно разбавленных ферромагнитных сплавов мала, и слабое дипольное поле не оказывает заметного влияния на распределение полей внутри слоя ванадия, как это было в случае с образцами $\text{Ni}/\text{V}/\text{Ni}$.

Сверхпроводящее состояние

На рис. 1б показаны спектры ЯМР от одиночной плёнки ванадия в сверхпроводящем состоянии в параллельной и перпендикулярной ориентациях относительно направ-

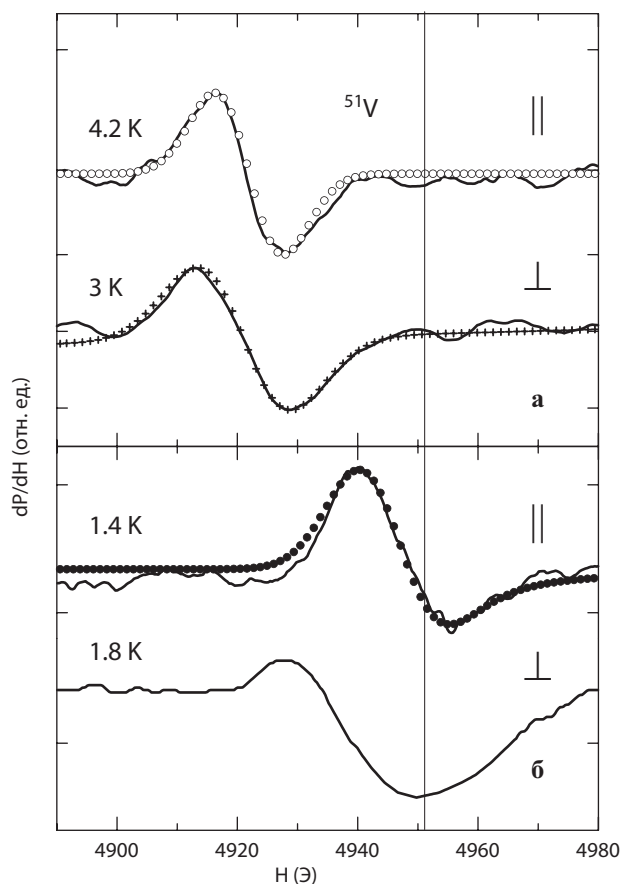


Рис. 2. Спектры ЯМР трёхслойного образца $\text{Ni}/\text{V}/\text{Ni}$ с толщиной ванадия $d = 44$ нм в нормальном (а) и сверхпроводящем (б) состояниях при параллельной (||) и перпендикулярной (⊥) ориентациях плоскости образца относительно направления внешнего магнитного поля. Открытыми кружками показан результат подгонки линией поглощения гауссовой формы. Крестиками (при перпендикулярной ориентации) показан результат подгонки линией поглощения гауссовой формы с учётом распределения дипольного поля от ферромагнитных слоёв. Закрытыми кружками показан результат подгонки спектров образцов в сверхпроводящем состоянии (при параллельной ориентации) с учётом эффекта спинового экранирования.

ления внешнего магнитного поля. При переходе в сверхпроводящее состояние резонансные линии смещаются в сторону больших магнитных полей. Форма линий в обоих случаях достаточно хорошо описывается гауссовой формой линии поглощения. Ширина линии спектра при параллельной ориентации практически не изменилась, в то время как в перпендикулярной ориентации происходит заметное уширение линии до $\Delta H = 15.5$ Э. Такое различие в ширинах связано с образованием вихрей магнитного поля в слое ванадия в перпендикулярной ориентации при переходе в сверхпроводящее состояние. Распределение вихрей магнитного поля в образце сильно зависит от геометрии эксперимента. Оценки показывают, что в параллельной ориентации образец находится в безвихревом состоянии. Безвихревое состояние может возникнуть, если толщина сверхпроводящей плёнки d_s меньше глубины проникновения λ_L магнитного поля

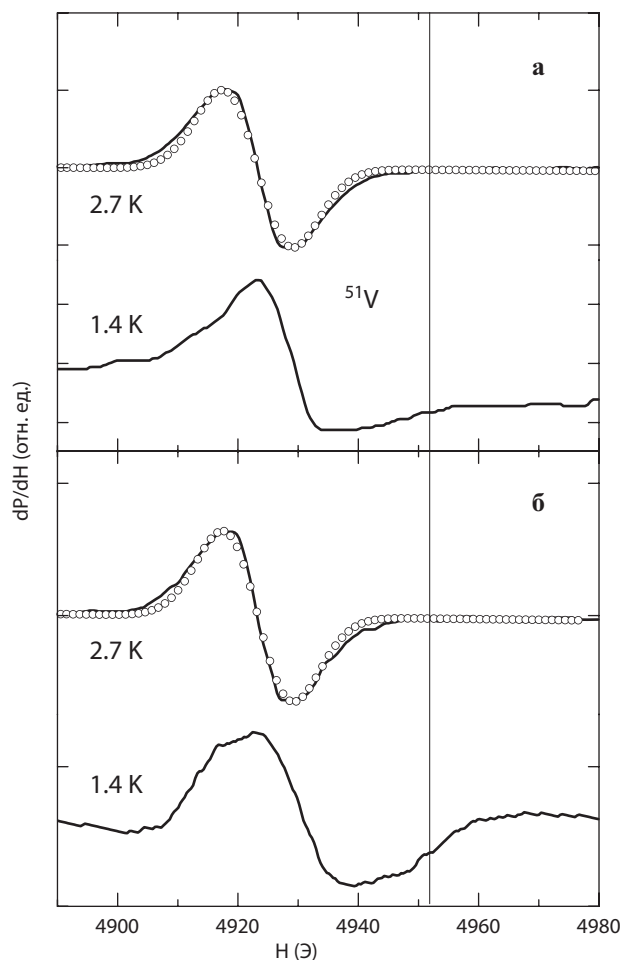


Рис. 3. Спектры ЯМР образца $\text{Pd}_{0.98}\text{Fe}_{0.02}/\text{V}/\text{Pd}_{0.98}\text{Fe}_{0.02}$ в нормальном (при $T = 2.7$ K) и сверхпроводящем (при $T = 1.4$ K) состояниях (а) и образца $\text{Pd}_{0.97}\text{Fe}_{0.03}/\text{V}/\text{Pd}_{0.097}\text{Fe}_{0.03}$ в нормальном (при $T = 2.7$ K) и сверхпроводящем (при $T = 1.4$ K) состояниях (б). Все спектры приведены для случая перпендикулярной ориентации плоскости образцов относительно направления внешнего магнитного поля. Кругами показаны результаты подгонки производной линией поглощения гауссовой формы.

[15]. В этом случае магнитное поле экспоненциально уменьшается при удалении от обеих поверхностей С-слоя вглубь на характерной длине, равной глубине проникновения λ_L . Расчёт показывает, что при имеющемся соотношении между $d_V = 30$ нм и $\lambda_L = 50$ нм, неоднородность распределения магнитного поля в безвихревом состоянии не приводит к уширению линии ЯМР. Это связано с тем, что магнитное поле оказывается неоднородным только в самой приповерхностной области плёнки. Свёртка распределения поля с гауссовой формой линии в данном случае приводит только к небольшому искажению крыльев резонансной линии.

При перпендикулярной ориентации вихри пронизывают весь образец. Такое неоднородное распределение магнитного поля в сверхпроводнике приводит к смещению и уширению резонансной линии. Форма линии ЯМР в смешанном состоянии сверхпроводника II рода определяется свёрткой линии ЯМР в нормальном со-

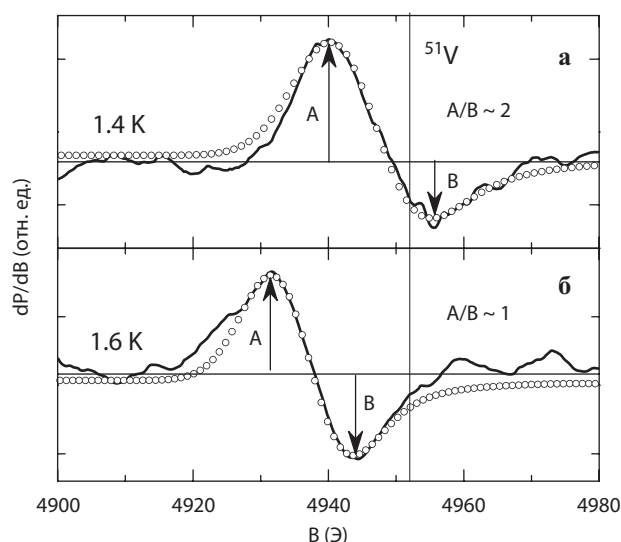


Рис. 4. Спектры ЯМР трёхслойных образцов Ni/V/Ni в сверхпроводящем состоянии в параллельной ориентации плоскости образца относительно направления внешнего магнитного поля с толщиной ванадия $d_V = 44$ нм (а) и $d_V = 70$ нм (б) (образец Ni/V/Ni*, см. таблицу 1). Кругами показаны результаты численной подгонки экспериментальных спектров с учётом эффекта спинового экранирования [см. соотношения (1) и (2) в тексте], величина параметра $H_m = 15$ Э.

стоянии с распределением поля в вихревом состоянии. Наблюдать истинное распределение локальных полей в вихревом состоянии можно лишь в свободных от пиннинга эллипсоидальных образцах, изготовленных из особо чистых монокристаллических материалов с параметром Гинзбурга-Ландау $\kappa \sim 1$ (например, сверхчистого ниобия) [16]. В наших же тонкоплёночных образцах оценённый нами параметр $\kappa \approx 3-4$. Это значит, что присутствует пиннинг. Пиннинг вихрей приводит к трансформации сингулярности в распределении магнитного поля в регулярной вихревой решётке в гауссово распределение с шириной, которая может быть оценена как $\Delta H_V \sim (H_{c2} - H_0)/2\kappa^2$. При поле $H_{c2} \sim 5000$ и $H_0 = 4920$ Э это даёт $\Delta H_V \sim 3.5$ Э. Если форма линии ЯМР в нормальном состоянии гауссова, то в сверхпроводящем состоянии она должна оставаться гауссовой с дополнительным уширением, оценённым выше. Именно это наблюдается в спектре ЯМР от однослойной плёнки ванадия в сверхпроводящем состоянии при перпендикулярной геометрии.

На рис. 2б приведены спектры ЯМР от трёхслойного образца, Ni/V/Ni в сверхпроводящем состоянии в обеих ориентациях внешнего магнитного поля относительно плоскости плёнки. Так же, как и в случае одиночной плёнки ванадия, с понижением температуры сигналы смещаются в сторону больших магнитных полей. Вместе с тем видно, что в обеих ориентациях происходит искажение формы линии в виде уширения высокополевого крыла.

Такое же поведение формы резонансной линии мы наблюдали и в спектрах от трёхслойных образцов $\text{Pd}_{0.98}\text{Fe}_{0.02}/\text{V}/\text{Pd}_{0.98}\text{Fe}_{0.02}$ и $\text{Pd}_{0.97}\text{Fe}_{0.03}/\text{V}/\text{Pd}_{0.097}\text{Fe}_{0.03}$ в сверхпроводящем состоянии (рис. 3 при $T = 1.4$ K).

Мы исследовали поведение формы резонансной линии в системе Ni/V/Ni в зависимости от толщины сверхпроводящего слоя ванадия $d_v = 44$ нм (рис. 4а) и $d_v = 70$ нм (рис. 4б). Видно, что с увеличением толщины слоя ванадия искажение высокополевого крыла исчезает.

Обсуждение результатов

Основным результатом наших экспериментов явился тот факт, что во всех спектрах изученных нами трёхслойных систем Ф/С/Ф происходит уширение высокополевого крыла при переходе в сверхпроводящее состояние. Искажения наблюдаются как при регистрации ЯМР в параллельной ориентации внешнего магнитного поля относительно плоскости образца, так и в перпендикулярной. На рис. 4а хорошо видно, что амплитуда высокополевого крыла B в системе Ni/V/Ni становится заметно меньше, чем амплитуда низкополевого крыла A . Такое поведение спектра не характерно для одиночной плёнки ванадия при переходе в сверхпроводящее состояние (см. рис. 1б).

Подобное искажение формы линии обычно наблюдается в металлических образцах с толщиной d , сравнимой с величиной скин-слоя δ . Согласно работе Н. Бломбергена [17], смесь дисперсии с кривой поглощения динамической магнитной восприимчивости металла приводит к искажению формы линии с параметром асимметрии A/B , который может изменяться в пределе от 1 (случай, когда $d \ll \delta$) до 2.55 (в случае $d \gg \delta$). При частоте 5.5 МГц, на которой мы проводили измерения ЯМР, величина скин-слоя, согласно оценкам, равна примерно 50 мкм. Толщины слоёв ванадия в наших образцах составляют 40–70 нм, что удовлетворяет условию $d \ll \delta$. Следовательно, никаких искажений формы линии не должно быть, что и наблюдается в эксперименте в спектрах одиночной плёнки ванадия ($A/B \approx 1$) при переходе в сверхпроводящее состояние. Дополнительным свидетельством является равенство единице ($A/B \approx 1$) параметра асимметрии в образце Ni/V/Ni с толщиной слоя ванадия 70 нм рис. 4б.

Мы также исключили вихревую структуру, как причину возникшей асимметрии сигнала в трёхслойных системах. Как было показано выше, переход в сверхпроводящее состояние и образование вихревой структуры не может явиться причиной искажения гауссовой формы линии ЯМР. Для наших трёхслойных систем Ф/С/Ф коэффициент Гинзбурга-Ландау $\kappa \approx 4$ –5. В связи с этим, так же, как и в случае однослойной плёнки ванадия, следует ожидать пиннинг вихрей на неоднородностях кристаллической структуры сверхпроводящих слоёв. Более того, Е. Брандтом [18] показано, что в трёхслойной системе Ф/С/Ф пиннинг вихрей может только усиливаться из-за контакта сверхпроводящей плёнки с ферромагнитной. Таким образом, при рассмотрении влияния вихрей на форму линии в наших трёхслойных образцах, мы приходим к выводу, что их образование при переходе в

сверхпроводящее состояние не может быть причиной уширения высокополевого крыла линии ЯМР.

Примечательным является тот факт, что с увеличением толщины ванадия в сверхпроводящем состоянии искажение формы линии в спектре ЯМР пропадает (рис. 4). В этом случае можно предположить, что механизмы, влияющие на форму резонансной линии, “работают” у границ раздела С/Ф на расстоянии примерно 10–20 нм от интерфейсов. С увеличением толщины С-слоя в резонанс вовлекаются всё больше ядер, не подверженных этому возмущению, и, следовательно, линия становится симметричной. Как было показано во введении, таким механизмом в трёхслойных системах Ф/С/Ф может быть проявление эффекта спинового экранирования.

Согласно модели спинового экранирования [9], спиновая поляризация электронов проводимости $\sigma(x)$ от границы раздела проникает в С-слой на глубину ξ_s так, что направление этой поляризации противоположно направлению намагниченности Ф-слоя, и, следовательно, направлению внешнего магнитного поля. Через сверхтонкое (контактное) взаимодействие эта спиновая поляризация индуцирует в окружении ядер сверхпроводника локальное магнитное поле H_{loc} , противоположное внешнему магнитному полю. Это означает, что при регистрации ЯМР от этих ядер сигнал будет смещаться в сторону больших магнитных полей. Для того, чтобы оценить, каким образом возникающая поляризация повлияет на регистрируемые спектры ЯМР от сверхпроводящих слоёв, нужно рассмотреть пространственное распределение индуцированного локального магнитного поля, спадающего экспоненциально в глубине С-слоя от обеих границ раздела с Ф-слоями:

$$H_{loc} = H_m \cosh(k_s x), \quad (1)$$

ось x направлена перпендикулярно плоскости образца, где $x = 0$ соответствует середине С-слоя, $k_s = 1/\xi_s$, а H_m – величина локального поля у границы раздела С/Ф. Тогда распределение этого поля будет

$$F(H) = \frac{1}{d} \int_0^d dx \delta[H - H_{loc}(x)]. \quad (2)$$

Свёртка этого распределения с невозмущённой производной гауссовой линии даст нам форму результирующего сигнала от С-слоёв с конечной индуцированной спиновой поляризацией, принимающей через границу раздела С/Ф. На рис. 4а закрытыми кружками показан результат подгонки экспериментального спектра образца Ni/V/Ni с толщиной ванадия $d = 44$ нм выше описанной моделью. С увеличением толщины С-слоя d_s , в соответствии с выражениями (1) и (2), резонансная линия становится более симметричной, как мы и наблюдаем в эксперименте с образцом, где толщина ванадия составляет $d_s = 70$ нм (см. результат подгонки в виде кружков на рис. 4б). Видно, что оба спектра достаточно хорошо аппроксимируются расчётными спектрами, учитывающими эффект спино-

вого экранирования. Величина подгоночного параметра H_m оказалась равной примерно 15 Э. Такая величина H_m является вполне приемлемой для случая границ раздела V/Ni, поскольку наши оценки с использованием теории Ф. Бержерета и др. [9] дают значения $H_m \approx 12$ Э.

Мы не проводили численную подгонку экспериментальных спектров для случаев перпендикулярной ориентации внешнего магнитного поля относительно плоскости образцов. Для этого в расчёт необходимо принять не только распределение локального поля, вызванного эффектом спинового экранирования, но и неоднородное распределение магнитного поля из-за вихревой структуры. При наличии пиннинга вихрей картина распределения магнитного поля в образце сильно усложняется и практически делает невозможным проведение численного моделирования. Поэтому мы приводим спектры для перпендикулярной геометрии с целью качественно показать, что тенденции уширения высокополевого крыла наблюдаются во всех образцах, независимо от их ориентации относительно направления внешнего магнитного поля. Это может быть связано только проявлением эффекта спинового экранирования.

Таким образом, с помощью созданного нами сверхчувствительного спектрометра ЯМР по уширению высокополевого крыла резонансной линии поглощения от трёхслойных систем Ф/С/Ф в сверхпроводящем состоянии нам впервые удалось наблюдать экспериментально предсказанный ранее теоретиками эффект спинового экранирования. Мы получили хорошее совпадение полученных нами экспериментальных спектров и рассчитанных с учётом модели эффекта спинового экранирования. Более того, мы показали, что при увеличении толщины С-слоя искажения формы резонансной линии исчезают, что свидетельствует о том, что эффекту подвержена только близкая к границе раздела С/Ф область сверхпроводящего слоя. Это означает, что спиновая поляризация электронов проводимости проникает в С-слой на глубину, сравнимую с величиной ξ_S . Этот факт находится в хорошем согласии с теоретическими представлениями.

Данное сообщение основано на результатах, опубликованных в соавторстве с Х. Цабелем, К. Вестерхольтом, К. Тейз-Брелем (Институт экспериментальной физики

твёрдого тела Рурского университета, г. Бохум, Германия) и Л. Р. Тагировым (Казанский государственный университет) [19, 20].

Работа выполнена при содействии гранта РФФИ № 08-02-00098 (эксперимент) и № 07-02-00963 (теория), а также Немецкого исследовательского общества DFG (грант SFB 491).

Литература

1. Garifullin I.A.: J. MMM **240**, 571–576 (2002)
2. Изюмов Ю.А., Прошин Ю.Н., Хусаинов М.: УФН **172**, 113–155 (2002)
3. Buzdin A.I.: Rev. Mod. Phys. **77**, 935–976 (2005)
4. Bergeret F.S., Volkov A.F., Efetov K.B.: Rev. Mod. Phys. **77**, 1321–1373 (2005)
5. Efetov K.B., Garifullin I.A., Volkov A.F., Westerholt K.: Magnetic heterostructures. Advances and perspectives in spinstructures and spintransport (Zabel H., Bader S.D., eds.) Series Springer Tracts in Modern Physics **227**, pp. 251–289. Berlin: Springer 2007.
6. Гарифуллин И.А., Гарифьянов Н.Н., Салихов Р.И., Вестерхольт К. и др.: ЖЭТФ **132**, 255–264 (2007)
7. Lazar L., Westerholt K., Zabel H., Tagirov L.R., Goryunov Yu.V., Garif'yanov N.N., Garifullin I.A.: Phys. Rev. B **61**, 3711–3722 (2000)
8. 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.: Phys. Rev. B **66**, 020505(1-4) (2002)
9. Bergeret F.S., Volkov A.F., Efetov K.B.: Phys. Rev. B **69**, 174504(1-4) (2004)
10. Morenzoni A., Khasanov R., Luetken H., Prokscha T., Suter A., Garif'yanov N.: Physica B **326**, 196–204 (2003)
11. Wilson K.J., Valabhan C.P.G.: Meas. Sci. Technol. **1**, 458–460 (1990)
12. Гарифуллин И.А., Гарифьянов Н.Н., Салихов Р.И., Тагиров Л.Р.: Письма в ЖЭТФ **87**, 367–371 (2008)
13. Pippard A.B.: Rep. Prog. Phys. **23**, 176–266 (1960)
14. Noer B.J., Knight W.D.: Rev. Mod. Phys. **36**, 177–185 (1964)
15. Burger J.P., Deutscher G., Guyon E., Martinet A.: Phys. Rev. **137**, A853–A859 (1965)
16. Brandt E.H.: J. Low Temp. Phys. **73**, 355–390 (1988)
17. Blombergen N.: J. Appl. Phys. **23**, 1383–1390 (1952)
18. Brandt E.H.: Physica B **404**, 695–699 (2008)
19. Salikhov R.I., Garifullin I.A., Garif'yanov N.N., Tagirov L.R., Theis-Bröhl K., Westerholt K., Zabel H.: Phys. Rev. Lett. **102**, 087003(1-4) (2009)
20. Salikhov R.I., Garif'yanov N.N., Garifullin I.A., Tagirov L.R., Westerholt K., Zabel H.: Phys. Rev. B **80**, 214523(1-8) (2009)

Фемтосекундный эхо-процессинг в полимерной плёнке, допированной красителем, при комнатной температуре

Г. М. Сафиуллин, В. Г. Никифоров, В. С. Лобков, В. В. Самарцев, А. В. Леонтьев

Отдел химической физики, лаборатория быстротекущих молекулярных процессов; лаборатория нелинейной оптики

Исследована возможность реализации при комнатной температуре побитной логической операции параллельного умножения для оптического процессора, работающего на основе нелинейного оптического отклика среды третьего порядка. В качестве резонансной среды использована плёнка поливинилбутираля, допированная красителем фталоцианина. Время реализации логической операции, которая представлена в спектре нелинейного отклика среды после воздействия двух спектрально кодированных импульсов накачки, составляет менее 1 пс. Установлена величина однородного уширения (S_0 - S_1 линии) $\Gamma_{\text{hom}} = 89 \text{ см}^{-1}$ и $\Gamma_{\text{hom}} = 44 \text{ см}^{-1}$ для температур 300 и 77 К, соответственно. Определены параметры лазерного возбуждения для организации эффективной работы оптического процессора. Сделаны оценки максимально возможного числа бит логической операции.

Введение

В последнее время активно рассматривается возможность создания оптического компьютера, осуществляющего сверхбыстрые логические операции, основанные на различных оптических нелинейных процессах [1, 2]. Одним из перспективных направлений является эхо-процессинг, который, как показано в работах [3, 4], позволяет реализовывать логические операции побитного умножения. В качестве рабочей среды перспективными являются молекулы красителей в полимерных плёнках [4], поскольку они представляют собой сильно разупорядоченные среды и характеризуются широкой полосой неоднородного поглощения. Для полимерных плёнок, допированных красителем, ширина линии может превышать несколько терагерц, что является важной характеристикой рабочих сред оптических процессоров, работающих с широкополосными фемтосекундными оптическими сигналами. Отметим, что особенности формирования фотонного эха в полимерной плёнке, допированной красителем фталоцианина, были изучены при низких температурах в работе [5] и при комнатной температуре в работах [6, 7].

Известно, что информационная ёмкость отдельной пространственной ячейки памяти определяется отношением неоднородной ширины к однородной, которое может достигать значения 10^7 для примесных кристаллов, активированных некрамерсовыми редкоземельными ионами [8]. В работе [3] показано, что при температурах жидкого гелия параметр однородного уширения в плёнке поливинилбутираля, допированной красителем фталоцианина, составляет 0.01 см^{-1} при неоднородной ширине полосы поглощения 500 см^{-1} , что позволяет реализовать операцию параллельного логического умножения 10^3 – 10^4 бит за время 10^{-11} с. Это осуществляется в экспериментах по регистрации двухимпульсного фотонного эха, где биты закодированы в спектре возбуждающих импульсов, а результат логической операции содержится в спектре

эхо-сигнала. Трудность реализации данной операции при комнатной температуре обусловлена существенным ростом величины однородного уширения. Это условие накладывает ограничение на спектральную ширину возбуждающих импульсов и, соответственно, на величину неоднородного уширения полосы поглощения образца. Возникает вопрос о реализации данной операции при комнатной температуре с использованием стандартной широкодоступной техники фемтосекундной спектроскопии с длительностью импульса 10–100 фс. Отметим, что данный вопрос имеет большое практическое значение, поскольку выполнение логических операций при комнатной температуре существенно упрощает технологическую реализацию оптического процессора.

Эксперимент

В настоящей работе в качестве исследуемого образца использована полимерная плёнка поливинилбутираля толщиной 65 мкм, легированная молекулами фталоцианина (Ciba HW 1009) в концентрации 10^{-3} – 10^{-4} моль/литр. Спектр поглощения этой плёнки при разных температурах приведён на рис. 1.

Схема экспериментальной установки показана на рис. 2. Импульсы Ti:Sp-лазера с частотой следования 100 МГц, длительностью 50 фс и средней мощностью 400 мВт поступают на стретчер, где они chirпируются и затем подаются на регенеративный усилитель. Частота следования импульсов определяется лазером накачки усилителя и составляет 3 кГц с энергией до 30 мкДж. С усилителя импульсы поступают на компрессор, где они укорачиваются до 60 фс. После усиления лазерные импульсы характеризуются спектральной шириной 30 нм с максимумом на длине волны 783 нм и длительностью 60 фс. Для регистрации времяз разрешённых оптических откликов применяется техника ап-конверсии с использо-

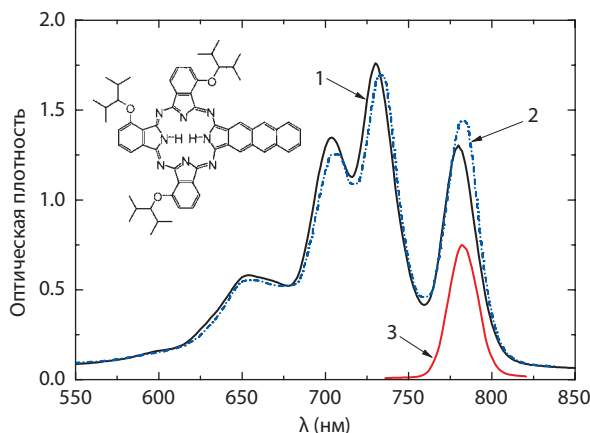


Рис. 1. Молекулярная структура и спектры поглощения красителя фталоцианина в плёнке поливинилбутирала (1) – при 300 К, (2) – при 10 К (из работы [5]). (3) – спектр возбуждающих импульсов.

ванием кристалла КДП, толщиной 300 мкм. Методика регистрации времяразрешённого и интегрального оптических откликов среды аналогична методикам, описанным в работах [9, 10]. Детектирование сигнала проводится на ФЭУ-62, оснащённом предварительным усилителем. Настройка параметров лазерных импульсов проводится по контролю на цифровых запоминающих осциллографах, автоматизированном спектрометре с детектором на

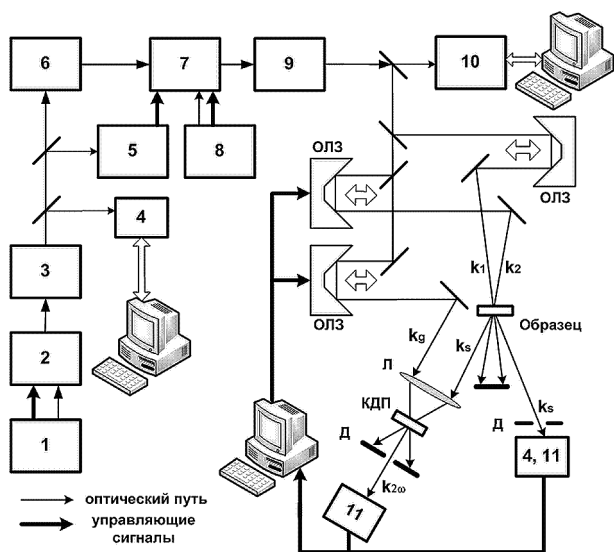


Рис. 2. Блок-схема установки для регистрации интегрального и времяразрешённого оптических откликов среды. (1) – блок управления и диодной накачки (FPU 35) для лазера “Finesse 532”; (2) – лазер для накачки генератора фемтосекундных импульсов “Finesse 532”; (3) – генератор фемтосекундных импульсов (ФИ) TISSA100; (4) – спектрометр с детектором на ПЗС-линейке (ПЗС – прибор с зарядовой связью); (5) – блок управления и синхронизации регенеративного усилителя RA-100/3; (6) – стретчер ФИ; (7) – регенеративный усилитель RA-100/3; (8) – блок управления и диодной накачки для лазера усилителя RA-100/3; (9) – компрессор ФИ; (10) – автокоррелятор ASF-20; ОЛЗ – оптические линии задержки; Л – фокусирующая линза; Д – диафрагма; (11) – детектор сигнала (ФЭУ-62 с предварительным усилителем). (Производитель блоков 3, 5–10 – ООО “Авеста”, Россия).

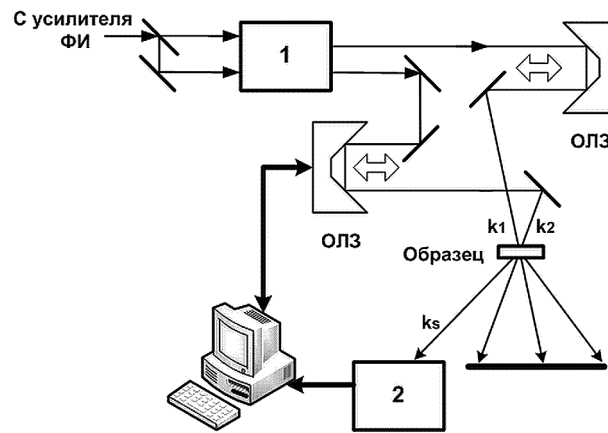


Рис. 3. Блок-схема установки для реализации логической операции побитного умножения. (1) – компрессор ФИ; ОЛЗ – оптические линии задержки; (2) – спектрометр.

ПЗС-линейке и автокорреляторе. Реализация побитной операции логического умножения осуществляется без построения специального устройства кодирования спектра импульса, как в работах [3, 4]. Блок-схема установки для реализации логической операции побитного умножения приведена на рис. 3. В представленной схеме в качестве кодера использован компрессор. Апертура оптических элементов компрессора (дифракционной решётки и зеркал) позволяет независимо работать с двумя лучами, и разделение светового пучка на два луча выполняется до компрессора. Спектральное кодирование пучка делается путём наложения маски на одно из зеркал компрессора. Далее лучи возбуждающих импульсов заводятся на оптические линии задержки и на образец. Параметры импульсов контролируются на автокорреляторе. Регистрация спектров оптического отклика среды проводится на спектрометре с детектором, реализованном на ПЗС-линейке.

Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлен спектр поглощения плёнки поливинилбутирала, допированной красителем фталоцианина, при температурах 10 и 300 К, показана область возбуждения лазерными импульсами длительностью 50 фс и спектральной шириной 30 нм. Из рисунка видно, что спектры, зарегистрированные при гелиевой и комнатной температурах, мало различаются, что говорит о сильном неоднородном уширении. Видно, что возбуждение происходит в области 770–800 нм неоднородно уширенной линии поглощения образца, соответствующей переходу $S_0 \rightarrow S_1$.

На рис. 4 показана схема двухимпульсного возбуждения среды с одновременной регистрацией сигнальных лучей двумя детекторами. В данном эксперименте импульсы накачки с волновыми векторами k_1 и k_2 резонансно воздействуют на оптически нелинейную среду. За счёт оптических эффектов нелинейности третьего порядка происходит излучение двух параметрически смешанных

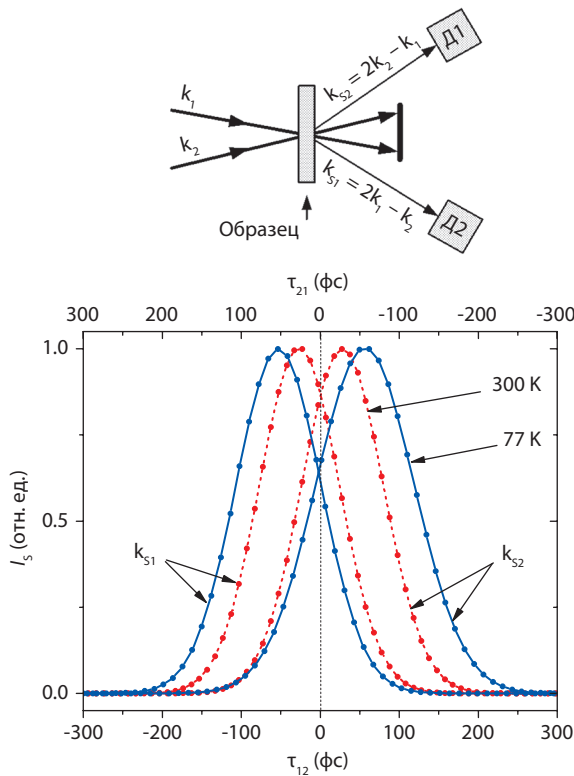


Рис. 4. Оптическая схема регистрации интегральной интенсивности оптического нелинейного отклика среды I_s на двух детекторах Д1 и Д2. На графике показана зависимость I_s в направлениях $\mathbf{k}_{s2} = 2\mathbf{k}_2 - \mathbf{k}_1$ (нижняя шкала абсцисс) и $\mathbf{k}_{s1} = 2\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2$ (верхняя шкала абсцисс) от задержки между возбуждающими импульсами τ_{12} и τ_{21} , соответственно, при 77 и 300 К.

волн в направлениях $2\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2$ и $2\mathbf{k}_2 - \mathbf{k}_1$. В зависимости от условий эксперимента, в этих направлениях регистрируются сигналы самодифракции и эха. Если спектральная ширина неоднородной полосы поглощения образца сравнима или больше спектральной ширины возбуждающих импульсов, характеризующихся спектральными интенсивностями $I_1(\nu)$ и $I_2(\nu)$, то регистрируемые детекторами интенсивности рассеянных волн I_{s1} и I_{s2} в направлениях $2\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2$ и $2\mathbf{k}_2 - \mathbf{k}_1$ пропорциональны [11, 12]

$$I_{s1} \propto \int I_2(\nu) I_1(\nu)^2 d\nu \text{ и } I_{s2} \propto \int I_1(\nu) I_2(\nu)^2 d\nu. \quad (1)$$

В экспериментах без спектральной кодировки возбуждающих импульсов использовались когерентные импульсы с одинаковыми спектральными интенсивностями $I_1(\nu) = I_2(\nu)$ и малой импульсной площадью $(d/\hbar) \int E(t) dt \ll 1$ (d – дипольный момент электронного перехода, $E(t)$ – огибающая напряжённости импульсов). В этих условия интенсивность сигнала нелинейного отклика I_s пропорциональна

$$I_{s1} \propto I_2 I_1^2 \text{ и } I_{s2} \propto I_1 I_2^2, \quad (2)$$

где I_1 и I_2 – интегральные интенсивности воздействующих на образец лазерных лучей. На рис. 4 показаны

зависимости интегральных оптических откликов среды I_{s1} и I_{s2} от задержки между импульсами накачки τ_{12} при одновременной регистрации на двух детекторах. Такая методика необходима для точного определения положения нуля $\tau_{12} = 0$ на шкале временных задержек. Положение нуля соответствует пересечению двух симметричных графиков при построении их на взаимно обращённых шкалах оси абсцисс. Смещение максимумов кривых относительно нуля показывает отличие этих кривых от просто автокорреляционных функций и демонстрирует немгновенный характер оптического отклика. Положения максимумов кривых показывают наиболее оптимальное значение временной задержки $\tau_{12} = 30$ фс при комнатной температуре и $\tau_{12} = 60$ фс при температуре жидкого азота.

На рис. 5 представлены экспериментальные данные, показывающие зависимости интенсивности оптического отклика I_s от вариации интенсивностей возбуждающих лучей I_1 и I_2 . Видно, что зависимость I_s от I_1 имеет линейный характер, а I_s от I_2 – квадратичный, что согласуется с выражением (2). Отметим, что максимум I_s при условии $I_1 + I_2 = \text{const}$ достигается при соотношении интенсивности накачивающих лучей $I_1:I_2 = 1:2$, что является важным фактором для увеличения соотношения сигнал/шум и уменьшения термической деградации образца.

Наши исследования показали, что интенсивность сигнала возбуждения ограничивается лучевой стойкостью образца. Исследуемая плёнка с красителем при комнатной температуре имеет тенденцию при плотности лазерного излучения больше 0.4 Вт/см^2 образовывать постоянную пространственную решётку, а при 0.6 Вт/см^2 термически деградирует. Поэтому все эксперименты проводились при меньшей плотности лазерного излучения.

Для возбуждающих импульсов, длительность которых много меньше времени дефазировки T_2 , интенсивность

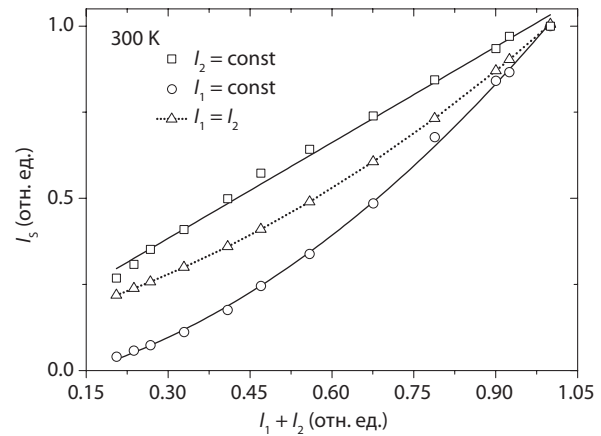


Рис. 5. Интенсивности интегрального отклика среды I_s в направлении $\mathbf{k}_s = 2\mathbf{k}_2 - \mathbf{k}_1$ в зависимости от суммарной интенсивности возбуждающих импульсов $(I_1 + I_2)$. Символами обозначены кривые, соответствующие: $\square$ – ($I_2 = \text{const}$), $\circ$ – ($I_1 = \text{const}$), Δ – ($I_1 = I_2$). Линиями показаны линейная и квадратичная аппроксимации.

оптического отклика среды (т.е. фотонного эха) определяется выражением [11]

$$I_S(\tau_{12}) \propto \exp(-4\tau_{12}/T_2). \quad (3)$$

В работе [5] показано, что при высоких температурах в плёнке поливинилбутурала, допированной красителем фталоцианина, время дефазировки T_2 составляет величину порядка сотен фемтосекунд. Это указывает на то, что в нашем эксперименте при комнатной температуре время дефазировки сравнимо с длительностью лазерных импульсов, что не позволяет использовать выражение (3) для анализа экспериментальных данных. Теоретический анализ нелинейного отклика среды для этого случая представлен в работах [13, 14]. Для анализа нашего эксперимента мы использовали работу [14], в которой рассматривается резонансный нелинейный отклик среды, состоящей из ансамбля двухуровневых систем, при двух-импульсном возбуждении. Показано, что в случае большого неоднородного уширения зависимость интенсивности I_S от задержки τ_{12} описывается выражением

$$I_S(\tau_{12}) \propto \int_0^\infty dt \int_0^\infty dt' f(t' - t) f(t - \tau_{12}) \times f(t' - \tau_{12}) \exp(-2(t + t')/T_2), \quad (4)$$

где $f(t)$ – автокорреляционная функция огибающих импульсов накачки, которую в нашем случае с большой точностью мы моделируем функцией Гаусса

$$f(t) = \exp(-t^2/\Delta\tau^2) \quad (5)$$

с параметром $\Delta\tau = 95$ фс, характеризующим длительность импульсов накачки. Результаты моделирования представлены на рис. 6 сплошными линиями. Таким образом, нами установлено, что при комнатной температуре величина однородного уширения $\Gamma_{\text{hom}} = 1/\pi \cdot T_2$ составляет $2.6 \cdot 10^{12}$

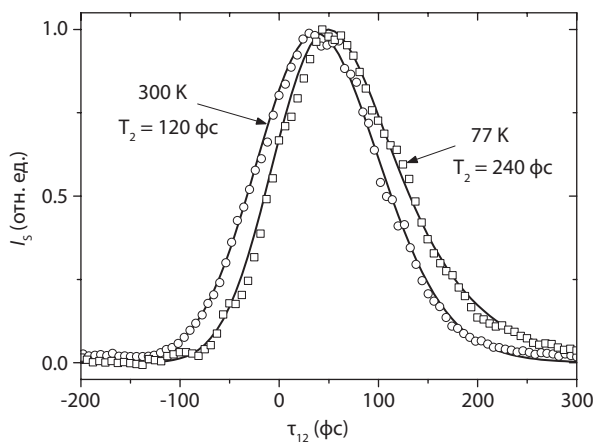


Рис. 6. Зависимость интегральной интенсивности отклика среды I_S от времени задержки τ_{12} . Сплошными кривыми показано моделирование.

Гц (89 см^{-1}) и $1.3 \cdot 10^{12}$ Гц (44 см^{-1}) – при температуре жидкого азота. Полученные параметры хорошо согласуются с результатами работы [5], в которых использовалась иная экспериментальная методика.

На рис. 7б показаны времяразрешённые отклики среды, полученные на основе генерации второй гармоники на кристалле КДП путём смешивания нелинейных откликов среды с третьим опорными сканирующим импульсом (см. рис. 2). Интенсивность времяразрешённого сигнала определяется свёрткой оптического нелинейного отклика среды с опорным лазерным импульсом. Моделирование

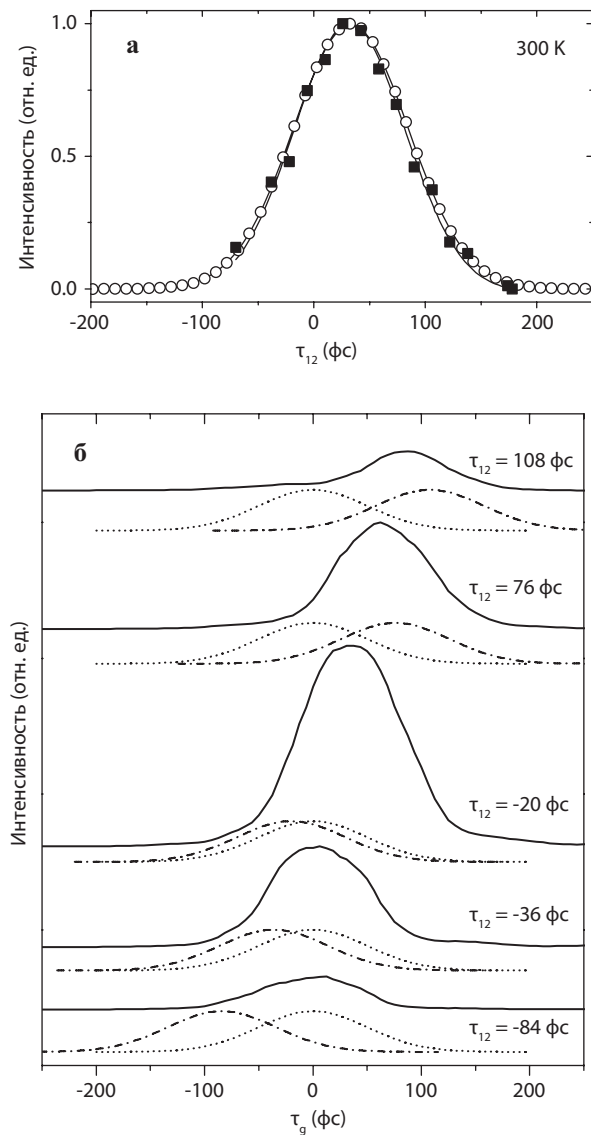


Рис. 7. а Зависимость интегральной интенсивности отклика среды I_S от времени задержки τ_{12} ; $\circ$ – экспериментальный интегральный сигнал, $\blacksquare$ – кривая, полученная интегрированием времяразрешённых откликов. **б** Зависимость времяразрешённого отклика среды от опорного импульса τ_g ; пунктирная линия – временной профиль фиксированного импульса k_1 , штрих-пунктирная линия – временной профиль сканирующего импульса k_2 , сплошная линия – сигнал ап-конверсии k_{20} , полученный путём смешивания на кристалле КДП – волны оптического отклика k_s и волны опорного сканирующего импульса k_g .

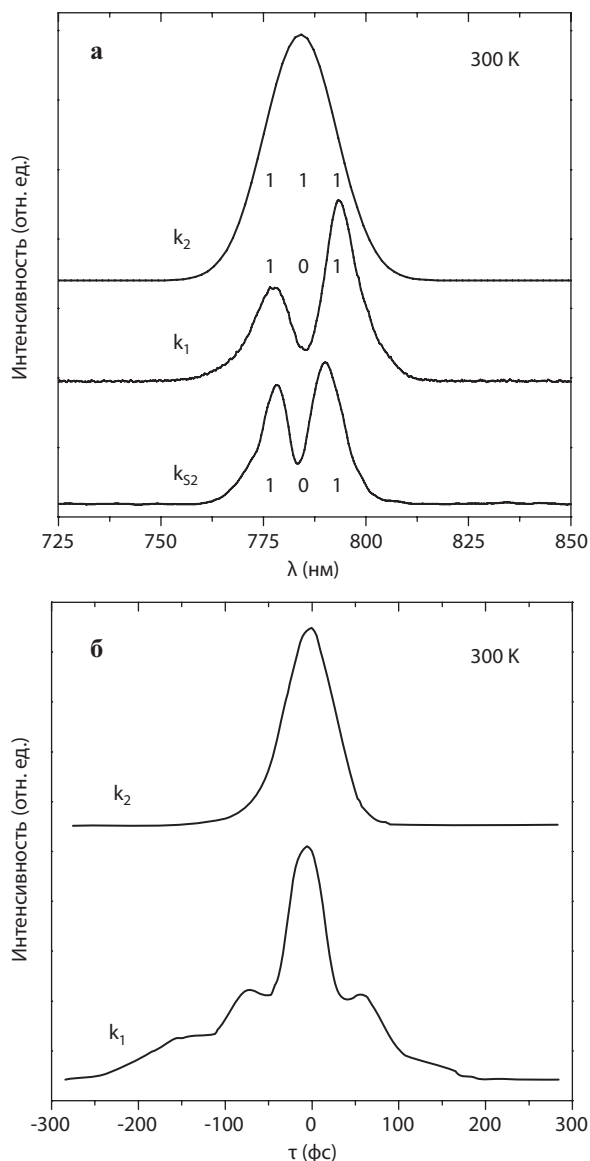


Рис. 8. а Спектры возбуждающих импульсов k_1 и k_2 оптического отклика среды k_{S2} при $\tau_{12} = 30$ фс. б Временные профили возбуждающих импульсов, измеренные на автокорреляторе ASF-20.

показало, что времяразрешенный сигнал фактически повторяет временной профиль нелинейного отклика. Рисунок 7б демонстрирует явную зависимость момента появления оптического отклика от задержки между возбуждающими импульсами τ_{12} . На этом же рисунке представлена зависимость интегральной интенсивности от задержки τ_{12} , которая получена на основании численной обработки времяразрешенных оптических откликов. Данная зависимость хорошо согласуется с экспериментально полученным интегральным откликом среды. Таким образом, наглядно видно, что наблюдаемый в эксперименте оптический нелинейный сигнал фактически является первичным фемтосекундным фотонным эхом, возбуждаемым в условии, когда время поперечной релаксации сравнимо с длительностью импульса. Отметим, что как для интегрального, так и времяразрешенного отклика,

максимум сигнала соответствует значению временной задержки $\tau_{12} = 30$ фс для температуры образца 300 К (см. рис. 7а).

В работах [3, 4] продемонстрирована возможность побитной логической операции умножения при температуре жидкого гелия, где в качестве рабочей среды также использовалась плёнка поливинилбутирала, допированная красителем фталоцианина. В [3, 8] показано, что величина частотного интервала в спектре импульса, соответствующего одному биту, не может быть меньше величины однородного уширения. В нашем случае неоднородное уширение полосы поглощения образца составляет ~ 500 см^{-1} , которая практически полностью накрывается спектром лазерных импульсов (см. рис. 1). Данная ситуация позволяет реализовать четырёхбитное слово при 300 К и восьмибитное слово при 77 К. В нашей работе рассматривается возможность такого эхо-процессинга при комнатной температуре, из-за чего выбрана наиболее простая кодировка спектра тремя битами. На рис. 8а изображены графики спектров возбуждающих импульсов и спектр оптического отклика. Видно, что максимумы спектра оптического отклика соответствуют областям перекрытия спектров возбуждающих импульсов, что соответствует операции логического умножения. Код спектров импульсов k_1 и k_2 состоит из слов $A = (1,1,1)$ и $B = (1,0,1)$. Результат побитной логической операции умножения представлен в спектре оптического отклика при комнатной температуре образца в виде слова $A \times B = (1,0,1)$. Таким образом, наведённая поляризационная решётка в образце является спектрально селективной, что может служить основой эхо-процессинга. Отметим, что длительность импульсов при их спектральной кодировке значительно возрастает. В нашем случае спектр второго возбуждающего импульса содержит трёхбитное слово, спектральная ширина одного бита составляет 160 см^{-1} , в результате чего длительность импульса возрастает до сотен фемтосекунд (см. рис. 8б).

Заключение

Выше представлены экспериментальные результаты, демонстрирующие параллельную операцию побитного умножения трёхбитных слов за время менее 1 пс. Эксперимент основывался на методе четырёхволнового смешения путём регистрации нелинейного оптического отклика среды, вызванного воздействием двух импульсов, спектры которых содержат трёхбитный код. Результат операции отражается в спектре нелинейного отклика среды. В качестве рабочей среды использована плёнка поливинилбутирала, допированная красителем фталоцианина. Поскольку реализация эхо-процессора при комнатной температуре является очевидным технологическим преимуществом, отметим, что важной особенностью данного эксперимента является выполнение операции логического умножения при 300 К. Однако, высокие температуры и, соответственно, большая величина одно-

родного уширения накладывают существенное ограничение на длину слова, которая в условиях нашего эксперимента при величине $\Gamma_{\text{hom}} = 89 \text{ см}^{-1}$ ограничена четырёхбитным кодом. Так как длина кодируемых слов является важным параметром, необходимо обсудить влияние наведённой тепловой решётки, которая образуется благодаря взаимной когерентности импульсов накачки. В ряде случаев [14, 15] вклад тепловой решётки в регистрируемый сигнал на порядок превосходит остальные отклики. Неучёт данного отклика может привести к значительному уменьшению оценки величины времени поперечной релаксации T_2 . В наших экспериментах использовалась схема с параллельными поляризациями когерентных импульсов накачки, поэтому мы полагаем, что в наблюдаемом сигнале на рис. 5 отклик тепловой решётки также присутствует. Соответственно, неучёт данного вклада при моделировании экспериментальных данных приводит к завышенной оценке величины однородного уширения Γ_{hom} , т.е. при комнатной температуре Γ_{hom} может быть значительно меньше 89 см^{-1} . Это обстоятельство указывает на то, что в условиях нашего эксперимента возможна реализация побитной логической операции умножения со словами, разрядность которых превышает четыре бита. Помимо этого, с целью увеличения битности рационально использовать импульсы накачки с меньшей длительностью и воздействовать на образец в более коротковолновой части спектра поглощения, обладающей большей величиной неоднородного уширения.

Мы выражаем благодарность проф. Александру Ребане (Университет штата Монтана, г. Боземан, США) за предоставленный образец. Работа поддержана Программой Президиума РАН “Квантовая физика конденсированных

сред” и ОФН РАН “Фундаментальная оптическая спектроскопия и ее применения”, грантом Президента РФ “Ведущие научные школы” (НШ 4531.2008.2), грантами РФФИ (№ 09-02-00136а, № 08-02-00032а, № 07-02-00883а и № 08-02-90001Бел.а).

Литература

1. McAuley A.D.: Optical Computing Architectures. New York: Wiley 1991. 560 p.
2. Jahns J., Lee S.H.: Optical Computing Hardware. New York: Academic Press 1994. 337 p.
3. Ollikainen O., Nilsson C., Gallusa J., Erni D., Rebane A.: Opt. Commun. **147**, 429–435 (1998)
4. Rebane A., Drobizhev M., Sigel Ch., Ross W., Gallus J.: J. Luminescence **83–84**, 325–333 (1999)
5. Rebane A., Gallus J., Ollikainen O.: Laser Phys. **12**, 1126–1134 (2002)
6. Lobkov V.S., Salikhov K.M., Samartsev V.V., Safiullin G.M.: Laser Phys. Lett. **3**, 26–30 (2006)
7. Lobkov V.S., Petrushkin S.V., Salikhov K.M., Samartsev V.V., Safiullin G.M., Vorobyev A.Yu.: Laser Phys. **17**, 647–651 (2007)
8. Калачёв А.А., Самарцев В.В.: Когерентные явления в оптике. Казань: КГУ 2003. 281 с.
9. Nibbering E.T.J., Wiersma D.A., Duppen K.: Phys. Rev. Lett. **66**, 2464–2467 (1991)
10. Pshenichnikov M.S., Duppen K., Wiersma D.A.: Phys. Rev. Lett. **74**, 674–677 (1995)
11. Манькин Э.А., Самарцев В.В.: Оптическая эхо-спектроскопия. М.: Наука 1984. 270 с.
12. Mukamel S.: Principles of nonlinear optical spectroscopy. New York: Oxford University Press 1995. 543 p.
13. Weiner A.M., De Silvestri S., Ippen E.P.: J. Opt. Soc. Am. B **2**, 654 (1985)
14. Kabayashi T., Terasaki A., Hattori T., Kurokawa K.: Appl. Phys. B **47**, 107 (1988)
15. Weiner A.W., Ippen E.P.: Opt. Lett. **9**, 53–55 (1983)

Фазовый переход в баллистических наноконтактах никеля

Р. Г. Гатиятов, В. Н. Лисин, А. А. Бухараев

Отдел химической физики, лаборатория физики и химии поверхности; лаборатория нелинейной оптики

Экспериментально обнаружен и исследован локальный фазовый переход из ферромагнитного в парамагнитное состояние в баллистических наноконтактах никеля. Установлено, что с уменьшением поперечного размера контакта происходит увеличение напряжения, при котором происходит фазовый переход. При разработке теоретической модели была учтена специфика локального нагрева баллистических наноконтактов, которая заключена в зависимости времени энергетической релаксации энергии электронов от приложенной разности потенциалов. Экспериментальные результаты находятся в хорошем качественном и количественном согласии с разработанной моделью.

Одним из интересных объектов исследования, к которому вот уже больше десятилетия проявляют внимание как с теоретической, так и с экспериментальной точек зрения, является “точечный контакт” между двумя металлическими проводниками [1, 2], характерные размеры которого могут быть как микро-, так и нанометрового масштаба. В последние годы наибольшая часть исследований сосредоточена на квантовых контактах атомарных размеров в силу большого количества квантово-размерных эффектов, обнаруживающихся в них [3–5]. Однако, как показывает практика, наноконтакты (НК) с поперечными размерами порядка длины волны Ферми электрона пока что малоприспособны для практического использования из-за их быстрого разрушения. С этой точки зрения большой интерес представляют НК, диаметр которых, с одной стороны, больше длины волны Ферми электрона, а с другой стороны, меньше или сравним с транспортной длиной свободного пробега электронов в контактирующих проводниках. Одной из актуальных задач при исследовании магнитных НК является изучение специфики нагрева НК и прилегающих к нему областей протекающим током, что, в частности, связано с реализацией в подобных структурах эффекта передачи спинового момента (spin transfer torque) [6, 7]. Нагрев до критической температуры должен приводить к фазовому переходу из ферромагнитного в парамагнитное состояние в области контакта. Ранее фазовый переход наблюдался в ряде ферромагнитных микроконтактов с диффузным типом транспорта электронов [8]. До настоящего времени изучение фазового перехода в баллистических НК не проводилось. Известно, что в случае баллистических НК приложенное напряжение падает в очень маленькой области порядка диаметра НК, а релаксация избыточной энергии электронов происходит вдали от этой области [9], что определяет специфику нагрева таких НК. Нагрев должен приводить к нелинейной проводимости НК, изучению которой посвящена настоящая работа.

В данной работе исследовались транспортные свойства НК Ni. Измерения проводились при комнатной

температуре в широком интервале приложенных к НК напряжений. НК Ni формировались электрохимическим методом в растворе по методике, описанной в работе [10]. Проводимость измерялась четырёхзондовым методом с использованием двух цифровых мультиметров Agilent 34410A. Регистрация вольт-амперных характеристик (ВАХ) НК осуществлялась путём подачи в цепь одиночного импульса напряжения треугольной формы с частотой 70 Гц. При этом максимальное приложенное к НК напряжение составляло 1 В. НК Ni формировались в растворе сульфата никеля $0.25 \text{ M NiSO}_4 + 0.5 \text{ M H}_3\text{BO}_3$ (рабочее напряжение 1–1.4 В). НК формировались между двумя зафиксированными на непроводящей подложке микропроводами Ni, разделёнными зазором в 10–20 мкм, путём электролиза рабочего раствора вплоть до момента формирования НК. Регистрация ВАХ осуществлялась в ёмкости с бидистиллированной водой, вклад проводимости которой в измеряемую проводимость НК пренебрежимо мал. Сопротивление НК при нулевом смещающем напряжении было в диапазоне 30–400 Ом.

Для сформированных НК Ni были зарегистрированы ВАХ (рис. 1). Прямая и обратная ветки ВАХ совпадают (отсутствие гистерезиса). С увеличением напряжения сопротивление НК возрастает. На зависимости первой производной сопротивления НК по напряжению от приложенной разности потенциалов имеется максимум (рис. 1). Обнаружено, что положение максимума зависит от сопротивления (размера) НК (рис. 2). При увеличении сопротивления НК (с уменьшением его диаметра) положение максимума смещается в сторону больших напряжений. Стоит отметить, что подобные эксперименты также были выполнены для НК Cu. В случае НК Cu на зависимости первой производной сопротивления по напряжению для того же диапазона приложенных напряжений никаких особенностей обнаружено не было.

Как известно, в ферромагнитных металлах температурная зависимость сопротивления определяется рассеянием электронов на фононах и магнонах. Для

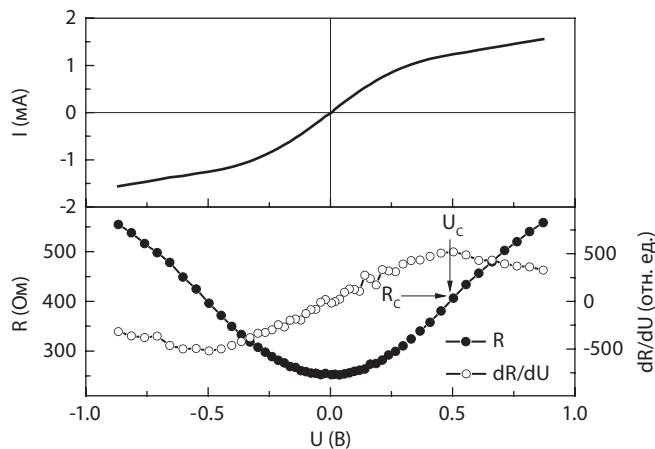


Рис. 1. Зависимости сопротивления и производной сопротивления по напряжению от приложенного к НК Ni напряжения.

температур выше температуры Кюри ($T_C = 631$ К для Ni) магнонный вклад становится постоянным, а рост сопротивления определяется только возрастанием вклада рассеяния электронов на фононах [11]. Это должно приводить к появлению максимума на зависимостях dR/dT и dR/dU . Обнаруженную нелинейность ВАХ мы связываем с тепловым нагревом НК и приконтактной области, а спад скорости возрастания сопротивления в НК никеля с переходом локально нагретой выше T_C области НК из ферромагнитного состояния в парамагнитное.

Сопротивление НК при критическом напряжении U_c , при котором происходит фазовый переход, может быть найдено из решения стационарного уравнения теплопроводности. Для его решения сделаем несколько допущений. Во-первых, предположим, что НК по форме совпадает

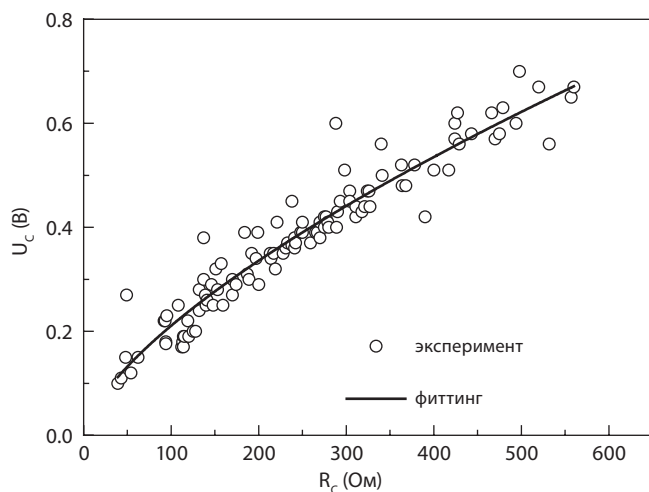


Рис. 2. Зависимость напряжения U_c , при котором происходит фазовый переход в области НК Ni, от сопротивления НК при этом напряжении. Каждая точка была получена из индивидуальной зависимости dR/dU от приложенного напряжения для НК с различным сопротивлением (размером).

с отверстием, т.е. диаметр НК d намного больше его длины. Во-вторых, будем считать, что релаксация энергии, которую приобретают электроны от ускоряющего электрического поля в НК, происходит в сфере радиуса b вокруг контакта и плотность выделяющейся в этой сфере тепловой энергии постоянна. В этом случае задача становится сферически симметричной. В установившемся режиме тепловой поток через сферу с радиусом r равен выделяемой в этой сфере мощности:

$$\oint_{S_b} q dS = \begin{cases} \frac{U^2}{R} \frac{r^3}{b^3} & r < b \\ \frac{U^2}{R} & r \geq b \end{cases}, \quad (1)$$

где $q = -\lambda \nabla T$ – тепловой поток, λ – объёмный коэффициент теплопроводности, U – приложенное к НК напряжение, R – сопротивление НК, S_b – поверхность сферы с радиусом b .

Решая систему уравнений (1), можно получить соотношение, связывающее температуру T_b на сфере с радиусом b и температуру T_{nc} в центре НК ($r = 0$):

$$\int_{T_0}^{T_b} \lambda(T') dT' = \frac{1}{4\pi b} \frac{U^2}{R} = \frac{2}{3} \int_{T_0}^{T_{nc}} \lambda(T') dT', \quad (2)$$

где T_0 – температура контактирующих проводников вдали от НК.

В случае ферромагнитных металлов релаксация приобретенной электронами энергии происходит за счёт неупругого рассеяния на фононах и магнонах. Если эта энергия превышает энергию фононов с частотой Дебая ($E_D = 35$ мэВ [10]) и обменную энергию ($E_m = 54.5$ мэВ [9]), то при каждом акте неупругого столкновения электрон испытывает рассеяние на большой угол и теряет энергию E_D или E_m . За время t электрон потеряет энергию, $E_D t / \tau_{eph} + E_m t / \tau_{em}$, где τ_{eph} и τ_{em} – времена релаксации импульса электрона при столкновении с фононами и магнонами, соответственно. Приравняв эту энергию eU , получаем, что скорость, с которой электрон теряет приобретенную во внешнем поле энергию, обратно пропорциональна приложенной разности потенциалов:

$$\frac{1}{\tau_E(\tilde{T}, U)} = \frac{1}{eU} \left(\frac{E_D}{\tau_{eph}(\tilde{T})} + \frac{E_m}{\tau_{em}(\tilde{T})} \right), \quad (3)$$

где e – заряд электрона, $\tilde{T}$ – усредненная по шару с радиусом b температура. При записи выражения (3) было принято во внимание, что, проходя НК, электрон приобретает энергию равную eU в очень маленькой области порядка $d \ll b$ [1, 9].

Из формулы (3) видно, что для $eU \gg E_D, E_m$ время релаксации энергии τ_E намного больше транспортного времени τ_{tr} ($1/\tau_{tr} = 1/\tau_{eph} + 1/\tau_{em}$, если пренебречь рас-

сеянием на примесях). Поэтому можно считать, что в течение времени τ_E электрон движется диффузно, а величина b может быть оценена как:

$$b(\tilde{T}, U) = \sqrt{6D_{tr}(\tilde{T})\tau_E(U)} = \sqrt{2l_{tr}(\tilde{T})l_E(U)} \\ = \sqrt{2l_{tr}(\tilde{T}) \frac{eU}{\frac{E_D}{l_{eph}(\tilde{T})} + \frac{E_m}{l_{em}(\tilde{T})}}} \propto \sqrt{U}, \quad (4)$$

где $D_{tr} = (1/3)v_F l_{tr}$ – транспортный коэффициент диффузии электронов, v_F – скорость Ферми, $l_{tr} = \tau_{tr} v_F$, $l_E = \tau_E v_F$.

Подставляя (4) в (2), получаем, что напряжение U_C , при котором происходит нагрев области НК до точки фазового перехода из ферромагнитного состояния в парамагнитное, и соответствующее ему сопротивление R_C для $eU_C \gg E_D, E_m$ связаны между собой степенным законом:

$$U_C = AR_C^{2/3}, \quad (5)$$

где постоянная величина A имеет вид:

$$A = \left[\frac{8\pi}{3} \sqrt{\frac{2el_{tr}(\tilde{T})}{\frac{E_D}{l_{eph}(\tilde{T})} + \frac{E_m}{l_{em}(\tilde{T})}}} \int_{T_0}^{T_C} \lambda(T') dT' \right]^{2/3}. \quad (6)$$

Покажем, что уравнение (7) может быть применено для описания экспериментальной зависимости $U_C(R_C)$, т.е. выполняется условие $d \ll l_{tr}(T_C)$. Диаметр сформированных НК Ni при $T_0 = 300$ К может быть найден по значению его сопротивления при нулевом смещающем напряжении с использованием формулы Векслера [12]:

$$R_W(T) = \frac{\gamma_w \rho_{tr}(T)}{d} + \frac{\gamma_{sh} C}{d^2}, \quad (7)$$

где $\rho_{tr}(T) = \rho_{eph}(T) + \rho_{em}(T)$ – удельное сопротивление, которое, если пренебречь столкновением с примесями, обязано рассеянию электронов на фононах и магнонах; $C = \rho_{tr} l_{tr} = \rho_{eph} l_{eph} = \rho_{em} l_{em}$ – коэффициент, связывающий удельное сопротивление и длину свободного пробега (определяется свойствами поверхности Ферми и не зависит от механизма рассеяния); γ_w – слабо зависящий от l_{tr}/d поправочный коэффициент порядка единицы [12]; $\gamma_{sh} = 16/3\pi$.

Для определения диаметра НК по формуле (7) необходимо знать величину транспортной длины свободного пробега $l_{tr}(T_0)$ и величину удельного электро-сопротивления ($\rho(T_0) = 7.2 \cdot 10^{-8}$ Ом·м для Ni [13]). Для оценки транспортной длины свободного пробега было использовано соотношение $l(T) = 5 \cdot 10^{-16}/\rho(T)$. Согласно сделанным оценкам, $l_{tr}(T_0) = 7$ нм и $l_{tr}(T_C) = 2$ нм. Рассчитанные диаметры НК с сопротивлением 30, 100 и

400 Ом составляют 6.4, 3.2 и 1.5 нм, соответственно. Видно, что баллистический транспорт электронов ($d < l_{tr}(T_C)$) для НК Ni должен существовать для НК с $R > 100$ Ом даже при температуре Кюри, а, следовательно, уравнение (5) должно описывать экспериментальную зависимость $U_C(R_C)$.

На рис. 2 сплошной линией представлен результат фиттинга методом наименьших квадратов экспериментальной зависимости U_C от R_C с функцией $U_C = AR_C^\alpha$. Путём фиттинга были извлечены показатель степени $\alpha = 0.67 \pm 0.02$, величина которого очень хорошо согласуется с показателем степени в выражении (5), а также коэффициент $A = (0.95 \pm 0.12) \cdot 10^{-2}$ В/Ом^{2/3}. Видно, что степенной закон (5) хорошо описывает экспериментальную зависимость U_C от R_C для $eU_C > E_D, E_m$ в широком диапазоне сопротивлений НК. Оценка величины A , по формуле (6), даёт значение $2.2 \cdot 10^{-2}$ В/Ом^{2/3}, что по порядку величины совпадает со значением, определённым экспериментально. Для оценки использовались следующие значения параметров: $\tilde{T} = (T_C + T_b)/2 = 570$ К ($T_b = 508$ К было найдено из уравнения (2) при $T_{nc} = T_C$ и известной экспериментальной зависимости $\lambda(T)$ [13]), $l_{tr}(\tilde{T}) = 2.6$ нм, $l_{eph}(\tilde{T}) = 3.9$ нм, $l_{em}(\tilde{T}) = 8.2$ нм.

В НК Ni с наименьшим сопротивлением в 30 Ом ($R_C = 40$ Ом) должен реализовываться диффузный тип транспорта электронов, т.к. $d > l_{tr}(T_C)$. Максимум на зависимости $dR/dU(U)$ достигается при напряжении 0.12 ± 0.02 В. Эта величина находится в хорошем согласии с величиной напряжения в 0.19 В, необходимого для нагрева диффузного микроконтакта Ni до критической температуры [8]. Здесь необходимо учесть, что в работе [8] нагрев производился от гелиевой температуры, а в данной работе – от комнатной температуры.

Сделанные оценки находятся в хорошем качественном и количественном согласии с экспериментальными результатами. Это подтверждает, что обнаруженная особенность на зависимостях $dR/dU(U)$ связана с локальным фазовым переходом из ферромагнитного в парамагнитное состояние в области баллистического контакта.

Таким образом, главная особенность нагрева баллистического НК протекающим током заключена в зависимости размера области, где происходит релаксация избыточной энергии электронов, от величины приложенного напряжения (для $|eU| \gg E_D, E_{ex}$). Это приводит к увеличению величины напряжения, необходимого для нагрева НК до критической температуры, при уменьшении диаметра НК (с увеличением сопротивления НК), в то время как в микроконтактах величина напряжения не зависит от размера контакта [8].

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 09-02-00568 и Программы ОФН РАН “Спин-зависимые эффекты в твёрдых телах и спинтроника”. Авторы работы выражают благодарность С. А. Зиганшиной за помощь в приготовлении рабочих электролитов.

Литература

1. Agrait N., Yeyati A.L., van Ruitenbeek J.M.: Phys. Rep. **377**, 81–279 (2003)
2. Jansen A.G.M., van Gelder A.P., Wyder P.: J. Phys. C: Solid State Phys. **13**, 6073–6118 (1980)
3. Chopra H.D., Sullivan M.R., Armstrong J.N., Hua S.Z.: Nature Mater. **4**, 832–837 (2005)
4. Huntington M.D., Armstrong J.N., Sullivan M.R., Hua S.Z., Chopra H.D.: Phys. Rev. B **78**, 035442(1-9) (2008)
5. Calvo M.R., Fernandez-Rossier J., Palacios J.J.: Nature **458**, 1150–1153 (2009)
6. Ralf D.C., Stiles M.D.: J. MMM **320**, 1190–1216 (2008)
7. Hatami M., Bauer G.E.W., Zhang Q., Kelly P.J.: Phys. Rev. Lett. **99**, 066603(1-4) (2007)
8. Verkin B.I., Yanson J.K., Kulik I.K., Shklyarevskii O.I., Lysykh A.A., Naydyuk Yu.G.: Solid State Commun. **30**, no. 4, 215–218 (1979)
9. Rokni M., Levinson Y.: Phys. Rev. B **52**, no. 3, 1882–1889 (1995)
10. Гатиятов Р.Г., Зиганшина С.А., Бухараев А.А.: Письма в ЖЭТФ **86**, вып. 6, 470 (2007)
11. Вонсовский С.В.: Магнетизм. М.: Наука 1971. 1032 с.
12. Wexler G.: Proc. Phys. Soc. **89**, 927–941 (1966)
13. Lide D.R.: Handbook of chemistry and physics. Florida: CRC Press 2003. 2475 p.

Формирование слоёв дисилицида железа при импульсной обработке плёнок железа, осаждённых на кремний магнетронным распылением

Р. И. Баталов, Р. М. Баязитов, Г. А. Новиков, В. А. Шустов, Ю. Н. Осин

Отдел радиационных воздействий на материалы, лаборатория интенсивных радиационных воздействий и лаборатория радиационной физики; отдел химической физики, группа роста кристаллов

Изучены структурно-фазовые превращения под действием импульсных ионных и лазерных пучков, а также термического отжига в системе железо–кремний, полученной путём магнетронного распыления плёнок железа различной толщины (80–800 нм) на кремниевые подложки. Установлена зависимость морфологии поверхности, элементного и фазового состава плёнок железа на кремнии от параметров их вакуумного осаждения (толщина плёнки, температура подложки) и последующих импульсных обработок (тип излучения, плотность энергии, число импульсов). Определены оптимальные режимы импульсных воздействий и термического отжига, приводящие к трансформации осаждённых плёнок железа в поликристаллические слои полупроводникового дисилицида железа (β -FeSi₂).

Введение

С конца 80-х годов XX века возник интерес к тонкоплёночной системе Fe-Si, поскольку было обнаружено, что β -FeSi₂ обладает рядом интересных оптических свойств, таких как прямая зонная структура с шириной оптической щели $E_g \sim 0.85$ эВ [1], фотолюминесценция в области длин волн $\lambda = 1.5$ – 1.6 мкм [2], а также высокий коэффициент поглощения света в видимой области ($\alpha > 10^5$ см⁻¹) [3]. Указанные свойства делают данный материал перспективным для изготовления излучателей света, фотоприёмников и солнечных элементов. Одним из основных методов получения тонких плёнок β -FeSi₂ является вакуумное осаждение Fe на Si с последующим термическим или импульсным отжигом. Было опубликовано несколько работ по импульсному лазерному синтезу силицидов железа путём облучения осаждённых на Si плёнок Fe различной толщины ($d = 20$ – 100 нм) лазерным излучением с различной длиной волны и длительностью импульса [4–8]. В то же время в литературе отсутствуют публикации по импульсной ионной обработке (ИИО) системы Fe/Si. В данной работе изучена зависимость структуры, элементного и фазового составов плёнок Fe на Si от параметров их вакуумного осаждения (толщина плёнки, температура подложки) и последующих импульсных обработок лазерными или ионными пучками. Результаты импульсных воздействий сравниваются с результатами термического отжига.

Эксперимент

Осаждение плёнок Fe на подложки Si (100) проводилось методом магнетронного распыления на вакуумном poste ВУП-5М. В качестве мишени для распыления использовалось железо с чистотой 99.9%. Подложки Si перед

загрузкой в вакуумную камеру подвергались химической очистке в этаноле и плавиковой кислоте с промывкой в дистиллированной воде. Давление в вакуумной камере перед осаждением железа составляло $\sim 4 \cdot 10^{-5}$ Торр. В процессе осаждения варьировалось его время (1–10 мин) и температура подложки Si (20–500 °C). Расстояние от мишени до подложки составляло 30 мм. Измерение толщины осаждённых плёнок проводилось на интерференционном и атомно-силовом микроскопах.

После осаждения плёнки Fe подвергались ИИО в вакууме сильноточными (до 150 А/см²) ионными пучками наносекундной длительности (C^+ , H^+ , $E = 300$ кэВ, $\tau = 50$ нс). При такой обработке доза вводимых ионов углерода и водорода не превышала 10^{13} ион/см². Для сравнения проводилась импульсная лазерная обработка (ИЛО) плёнок Fe на воздухе излучением рубинового ($\lambda = 0.69$ мкм, $\tau = 80$ нс) лазера, а также термический отжиг (ТО) в атмосфере азоте (чистота 98%) при температурах 700–800 °C в течение 15–30 мин. В процессе импульсных воздействий варьировалась плотность энергии излучений ($W = 1$ – 2.5 Дж/см²) и число импульсов ($N = 1$ – 10). Элементный состав и морфология поверхности осаждённых и отожжённых структур Fe/Si изучались с использованием сканирующего электронного микроскопа (Carl Zeiss EVO 50) и атомно-силового микроскопа (Solver P47). Фазовый состав в системе Fe/Si исследовался методом рентгеновской дифракции в скользящих лучах (РДСЛ) при углах падения $\phi = 1$ – 7° на дифрактометре ДРОН-7.

Результаты и обсуждения

Осаждение при комнатной температуре

На первом этапе экспериментов осаждение плёнок Fe проводилось на “холодную” ($T = 20$ °C) подложку Si.

Время осаждения составляло 3 мин, что приводило к образованию плёнки Fe толщиной $d \sim 240$ нм. Исследование методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) морфологии поверхности осаждённой плёнки Fe показало, что её поверхность была довольно гладкой, без характерной зернистой структуры, что косвенно указывает на аморфную природу плёнки Fe. Исследование элементного состава приповерхностной области структуры Fe/Si на глубину до 1 мкм показало, что, наряду со значительным содержанием кремния и железа, имеется также существенный вклад от кислорода (~ 10 ат.%), обусловленный его внедрением в плёнку как в процессе осаждения, так и при выдержке образца на воздухе.

На рис. 1а показаны спектры РДСЛ структуры Fe/Si, на которых виден узкий и интенсивный пик Si (311)

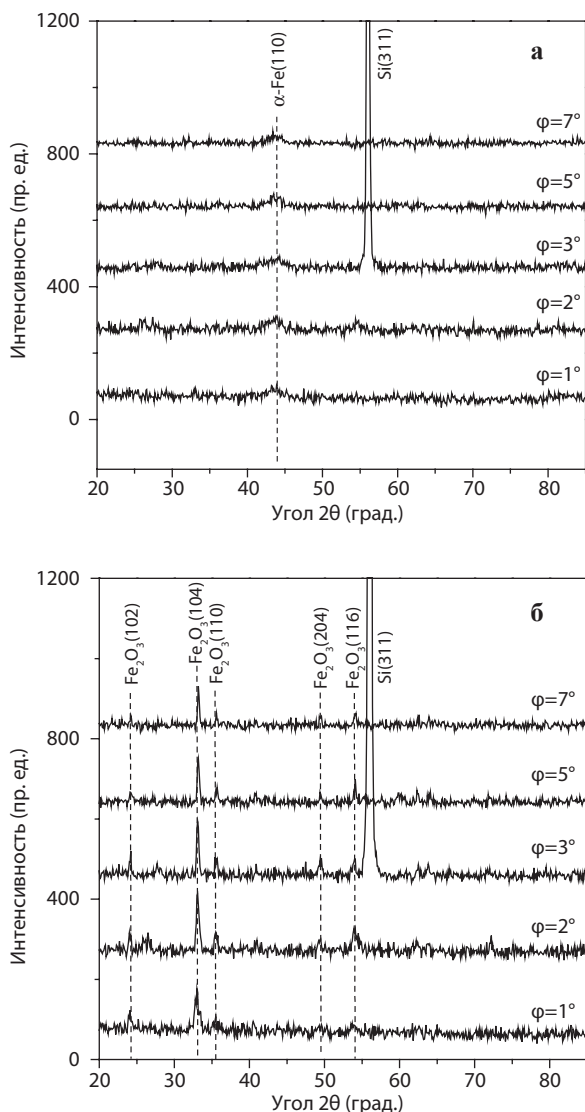


Рис. 1. Спектры РДСЛ плёнки Fe толщиной 240 нм, осаждённой на “холодную” подложку Si ($T = 20$ °C) методом магнетронного распыления: после осаждения (а), после термического отжига (800 °C, 30 мин) (б).

при угле $2\theta = 56^\circ$, обусловленный монокристаллической подложкой Si, а также широкий и слабый пик α -Fe (110) при угле $2\theta = 43.6^\circ$, связанный с аморфной плёнкой α -Fe. После осаждения отдельные образцы Fe/Si были отожжены в печи в среде азота с целью синтеза полупроводниковой фазы β -FeSi₂. Фазовый состав отожжённой плёнки показан на рис. 1б. Видно исчезновение исходного пика α -Fe (110) и появление новых пиков, соответствующих поликристаллическому оксиду железа Fe₂O₃. Данные результаты указывают на окисление почти всей осаждённой плёнки Fe в процессе отжига. На рис. 2а показано изображение поверхности плёнки Fe после ТО. Результатом отжига явилась фрагментация плёнки на зёрна с поперечными размерами 3–5 мкм. Необходимо отметить, что отжиг более толстой плёнки Fe ($d \sim 800$ нм) приводил к её отслаиванию от подложки, вследствие различия температурных коэффициентов расширения и её исходной слабой адгезии. Таким образом, термический отжиг плёнок Fe, осаждённых на “холодную” подложку Si, приводит к их окислению и отслаиванию от подложки.

Для сравнения применялась ИЛО осаждённой плёнки Fe. Облучение плёнки с плотностью энергии в области $W = 1.2$ – 1.5 Дж/см² приводит к образованию многочисленных проколов (кратеров). С ростом величины W до 1.7 Дж/см² размеры проколов значительно увеличива-

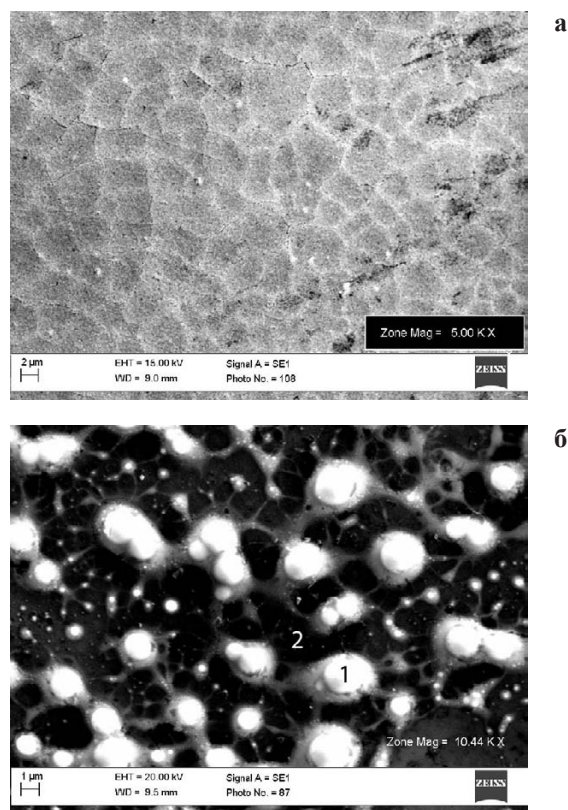


Рис. 2. а СЭМ-изображение осаждённой плёнки Fe после ТО (800 °C, 30 мин), б СЭМ-изображение осаждённой плёнки Fe после ИЛО ($W = 1.7$ Дж/см², $N = 2$). Цифрами 1 и 2 отмечены участки, с которых измерялся элементный состав.

Таблица 1.

Элемент	Атомный состав (%)	
	Участок 1	Участок 2
O	—	9.65
Si	5.13	88.95
Fe	94.87	1.4

ются (до единиц микрон), а оставшиеся участки плёнки Fe собираются в крупные фрагменты шарообразной формы размером 1–2 мкм (рис. 2б). Исследование элементного состава тёмных и светлых областей на рис. 2б (отмечены цифрами 1 и 2) показало (таблица 1), что тёмные участки представляют собой поверхность кремния, покрытую тонким слоем окисла (менее 10 ат.% O), с минимальным количеством железа (<1.5 ат.%), а светлые – микрочастицы железа (около 95 ат.%), слабо разбавленного кремнием и не содержащие кислород. Образование микрочастиц железа с минимальным содержанием кремния свидетельствует о том, что толщина расплавленного слоя в процессе ИЛО была меньше или сопоставима с толщиной осаждённой плёнки железа (~0.24 мкм) и фронт плавления практически не затронул подложку кремния.

Спектры РДСЛ плёнки Fe после ИЛО показали ослабление интенсивности пика α -Fe (110) и появление нового пика при угле $2\theta = 47.6^\circ$, соответствующего метастабильной фазе металлического дисилицида железа (γ -FeSi₂), что указывает на частичную фазовую трансформацию осаждённого железа в силицид. Образование метастабильной фазы γ -FeSi₂ согласуется с результатами работы [7], в которой проводилась импульсная обработка эксимерным лазером плёнок Fe, осаждённых на Si лазерной абляцией в сверхвысоком вакууме.

Наряду с лазерной обработкой применялась обработка системы Fe/Si мощными ионными импульсами. При ИИО отсутствуют потери энергии излучения на отражение от плёнки, а толщина расплавленного слоя значительно выше (до 1 мкм), что позволяет проводить перемешивание и перекристаллизацию толстых плёнок (до 0.5 мкм). Однако ИИО плёнок Fe, осаждённых на “холодную” подложку, также не дала желаемого результата. Вследствие слабой адгезии имела место значительная эрозия плёнки вплоть до полного ее удаления с поверхности подложки. Таким образом, слабая адгезия плёнки железа к подложке препятствовала их эффективному перемешиванию и формированию силицидов железа.

Осаждение при повышенных температурах

На втором этапе экспериментов проводилось осаждение плёнок Fe на нагретые подложки Si ($T = 400$ – 600°C) в течении 1, 3 и 10 мин, что соответствовало толщине плёнок около 80, 240 и 800 нм. На рис. 3а приведены

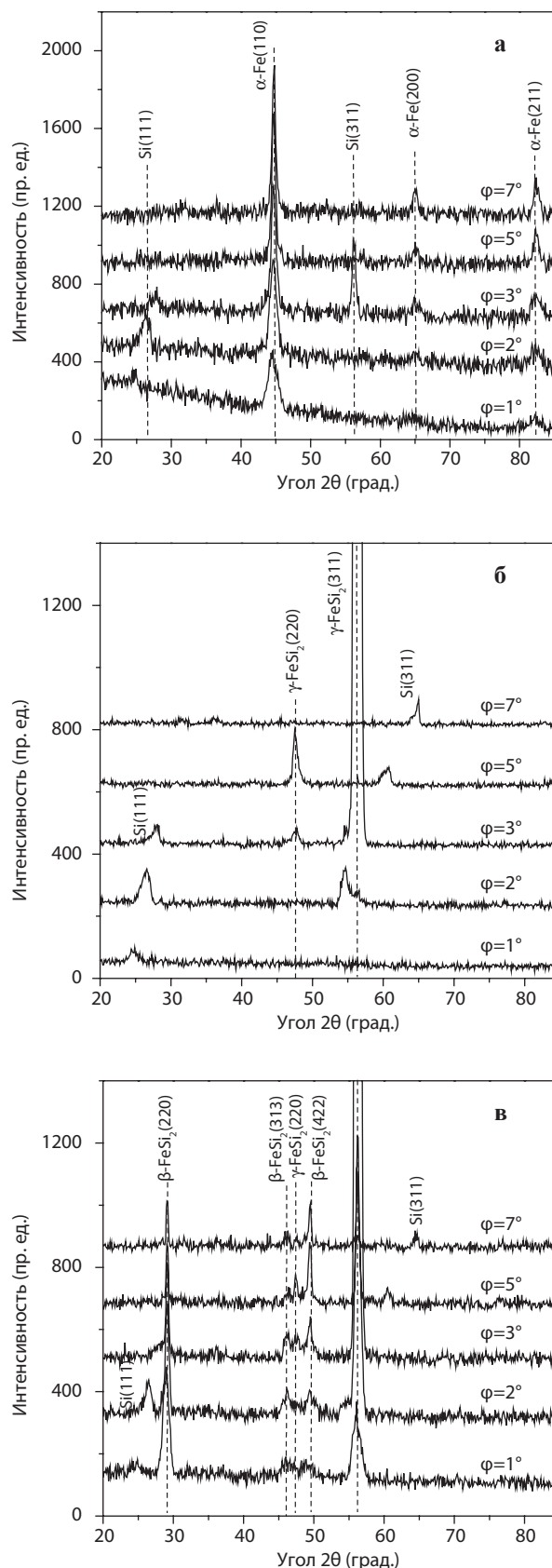


Рис. 3. а Спектры РДСЛ плёнки Fe, осаждённой на “горячую” подложку Si ($T = 500^\circ\text{C}$): а в течении 10 мин; б в течении 3 мин и затем подвергнутой ИИО большим числом импульсов ($N = 10$); в в течении 3 мин, подвергнутой ИИО и дополнительному ТО ($T = 700^\circ\text{C}$, 15 мин).

спектры РДСЛ плёнок Fe, полученных распылением на подложку при 500 °C в течение 10 мин. По сравнению с данными рис. 1а видно, что, благодаря нагреву подложки и большей толщине плёнки, исчезает пик от подложки Si, интенсивность основного пика α -Fe (110) значительно возрастает, ширина пика уменьшается и появляются другие пики α -Fe ((200) и (211)), что свидетельствует о формировании поликристаллической пленки железа с укрупнённым размером зерна. Отметим также, что, несмотря на нагрев подложки, в спектрах РДСЛ отсутствуют пики силицидов железа, что может быть связано с их малой толщиной (менее 10 нм), которая ниже предела чувствительности данного метода, а также влиянием примеси кислорода, которая действует как барьер для взаимодиффузии атомов Fe и Si на границе раздела с подложкой. По данным АСМ-измерений (не показаны) морфология поверхности плёнки Fe, осаждённой на “горячую” подложку Si, существенно меняется по сравнению с осаждением на “холодную” подложку, а именно, плёнка становится крупнозернистой с поперечными размерами зёрен Fe 0.3–0.5 мкм, что согласуется с данными РДСЛ. При этом шероховатость плёнки не превышает 4 нм.

В отличие от случая осаждения Fe на “холодную” подложку Si, ИИО плёнок Fe, осаждённых на “горячую” подложку Si, не приводит к их отслаиванию от подложки и сопровождается интенсивным перемешиванием атомов Fe и Si вследствие повышенной адгезии, а также большей глубины (до 1 мкм) и времени существования (до 0.8 мкс) расплава. Результатом интенсивной взаимодиффузии атомов плёнки и подложки в жидкой фазе является трансформация осаждённого железа в различные силициды железа (FeSi, γ -FeSi₂). Степень этой трансформации определяется параметрами осаждения и импульсных воздействий, такими как толщина плёнки, плотность энергии в импульсе и число импульсов. Из рис. 3б видно, что при большом числе импульсов ($N \sim 10$) вся плёнка Fe трансформируется в метастабильную фазу γ -FeSi₂. Исследование методом СЭМ морфологии

поверхности плёнки Fe после ИИО показало образование плотного массива поликристаллических силицидных зёрен с размерами 0.2–0.5 мкм (рис. 4).

Необходимо отметить, что в результате импульсных воздействий в спектрах РДСЛ не регистрировалась рефлекс полупроводниковой фазы β -FeSi₂, представляющей наибольший интерес для оптоэлектроники. Основным способом трансформации смеси металлических силицидных фаз в полупроводниковую фазу β -FeSi₂ является непродолжительный термический отжиг при температурах выше 600 °C [5–7]. Нами также проводилась дополнительная термическая обработка (700 °C, 15 мин) облучённых образцов с целью формирования однофазной гетероструктуры β -FeSi₂/Si, а также снятия механических напряжений в системе и устранения остаточной дефектности, вызванных быстрой кристаллизацией из расплава. Спектры РДСЛ, снятые после такой термической обработки, приведены на рис. 3в. Видно ослабление пика метастабильной фазы γ -FeSi₂ (220) и появление новых пиков ((220), (313) и (422)), относящихся к полупроводниковой фазе β -FeSi₂. По-видимому, данной температуры отжига недостаточно для полной трансформации толстой плёнки γ -FeSi₂ в однофазную плёнку β -FeSi₂ и требуются более высокие температуры отжига ($T \sim 800$ °C).

Таким образом, в данной работе установлено, что наиболее оптимальными условиями синтеза толстых (свыше 250 нм) слоёв β -FeSi₂ на кремнии является осаждение плёнки Fe на нагретую подложку Si ($T > 400$ °C) с последующей импульсной обработкой и термическим отжигом ($T > 700$ °C).

Выводы

Изучена структура, элементный и фазовый состав плёнок железа, осаждённых методом магнетронного распыления на кремниевую подложку при различных температурах, и подвергнутых импульсному и термическому воздействию. Получены следующие результаты:

1. Импульсная лазерная обработка плёнки железа ($d \sim 0.25$ мкм), осаждённой на “холодную” подложку Si ($T = 20$ °C), приводит к разрыву сплошной аморфной плёнки на отдельные островки железа с поперечными размерами 0.3–3 мкм вследствие слабой адгезии плёнки к подложке и малой глубины плавления ($d < 0.2$ мкм). Термический отжиг осаждённой плёнки железа приводит к её окислению и фрагментации на зёрна с размерами 3–4 мкм.
2. Осаждение толстых плёнок железа ($d = 80$ –800 нм) на нагретую подложку кремния ($T = 400$ –500 °C) приводит к формированию поликристаллической плёнки железа и не сопровождается образованием силицидов или оксидов железа.
3. Импульсная ионная обработка плёнок железа толщиной до 300 нм, осаждённых на нагретую подложку кремния ($T > 400$ °C), приводит к полной

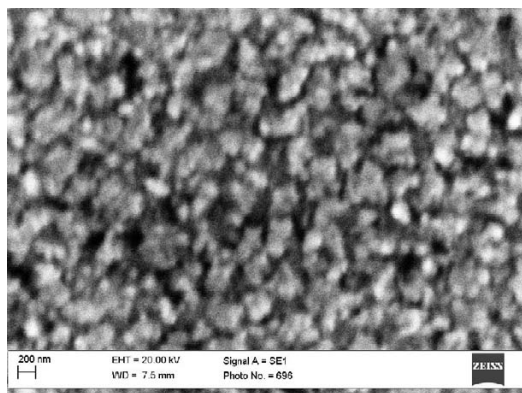


Рис. 4. СЭМ-изображение плёнки Fe, осаждённой на “горячую” подложку Si ($T = 500$ °C, 3 мин) и подвергнутой ИИО ($W = 1.4$ Дж/см², $N = 10$).

трансформации железа в силицидные фазы (FeSi , $\gamma\text{-FeSi}_2$) с размером зёрна до 0.5 мкм. Однофазный поликристаллический слой $\beta\text{-FeSi}_2$ формируется после дополнительного термического отжига при температурах свыше 700 °C.

Литература

1. Bost M.C., Mahan J.E.: J. Appl. Phys. **58**, 2696-2703 (1985)
2. Dimitriadis C.A., Werner J.H., Logothetidis S.: J. Appl. Phys. **68**, 1726-1734 (1990)
3. Katsumata H., Makita Y., Kobayashi N., Shibata H., Hasegawa M., Aksenov I., Kimura S., Obara A.: J. Appl. Phys. **270**, 406-410 (1996)
4. Gartner K., Gotz G., Kaschner C., Kasko I., Witzmann A., Zentgraf A.: Phys. Stat. Sol. (a) **112**, 747-752 (1989)
5. Datta A., Kal S., Basu S., Nayak M., Nath A.K.: J. Mater. Sci.: Mater. Electr. **10**, 627-631 (1999)
6. Falepin A., Comrie C.M., Vantomme A., Langouche G.: Hyperfine Interactions **134**, 153-160 (2001)
7. Wagner S., Carpene E., Schaaf P., Weisheit M.: Appl. Surf. Sci. **186**, 156-161 (2002)
8. Zhang J., Xie Q., Yu P., Xiao Q., Zhang Y., Yang Z., Liang Y.: Thin Solid Films **516**, 8625-8628 (2008)

Бесконтактная дифракционная методика измерения температуры поверхности образца при импульсном световом отжиге

М. Ф. Галяутдинов, Б. Ф. Фаррахов, Я. В. Фаттахов, М. В. Захаров

Отдел химической физики, лаборатория быстротекущих молекулярных процессов;
отдел медицинской физики, лаборатория методов медицинской физики

В работе предложен и продемонстрирован метод бесконтактного измерения температуры твёрдых тел при воздействии на него мощного светового импульса. Метод основан на использовании дифракции Фраунгофера и реализован на образцах кремния, нагреваемых до температуры плавления $T_{пл} = 1412\text{ }^{\circ}\text{C}$ мощным импульсом света. Текущая температура кремния определялась посредством измерения изменяющегося угла дифракции зондирующего лазерного луча. Угол дифракции изменялся во времени благодаря увеличению периода дифракционной решётки вследствие динамического теплового расширения кристалла. Исходная решётка формировалась на поверхности кремниевой пластины с периодом $d = 4\text{ мкм}$. В качестве зондирующего луча использовалось излучение He-Ne лазера с длиной волны $\lambda = 0.6328\text{ мкм}$.

Введение

Исследование динамики процессов рекристаллизации и локального анизотропного плавления поверхности имплантированного кремния во время импульсного светового отжига (ИСО) представляет большой научный и практический интерес. Ранее нами была разработана оригинальная методика, основанная на регистрации динамики развития дифракции Фраунгофера от специальных периодических структур, предварительно сформированных на поверхности изучаемых образцов [1]. При этом регистрировались изменения дифракционной эффективности решётки, вызванные структурно-фазовыми превращениями в процессе ИСО.

Очевидно, что для целенаправленного управления режимами ИСО и получения полной информации о структурных изменениях необходимо иметь бесконтактный метод контроля температуры импульсного нагрева вещества. Применение таких методов измерения температуры, как пирометрия [2], рамановское рассеяние света [3], дифракция электронов на кристаллической решётке [4], в данном случае ограничиваются их применимостью только к объектам с кристаллической структурой или затруднениями выделения полезного сигнала. Чувствительным методом оптической термометрии твёрдых тел является лазерная интерферометрия [5]. Но метод, основанный на дифракции Фраунгофера, применим в более широком интервале температур. В работе [6] авторы применили метод дифракции света для измерения температуры твёрдого тела в режиме медленного стационарного нагрева. В качестве сенсора использовалась плоская периодическая решётка, сформированная на карбиде кремния. Такой датчик позволил им измерить температуру до $370\text{ }^{\circ}\text{C}$.

С целью развития дифракционного метода измерения температуры применительно к исследованию динамики нагрева твёрдого тела при импульсных световых об-

работках нами были проведены экспериментальные исследования на образцах кремния в широком диапазоне температур, вплоть до температуры плавления монокристаллического кремния $1412\text{ }^{\circ}\text{C}$ при длительности ИСО от 50 мс до 20 с.

Методика эксперимента

Для исследования процессов нагрева и охлаждения образцов в процессе ИСО регистрировалась динамика изменения дифракционной картины Фраунгофера от фазовой решётки. С этой целью отслеживалось угловое перемещение дифракционных максимумов разных порядков k дифракции, которые для плоской монохроматической волны определяются уравнением:

$$\sin(\varphi) = \frac{k\lambda}{d}, \quad (1)$$

где φ – угол дифракции, d – период решётки, λ – длина волны.

При нагреве происходит тепловое расширение образца, соответственно – увеличение периода дифракционной решётки на величину:

$$\Delta d = \alpha d \Delta T, \quad (2)$$

где α – коэффициент теплового расширения, ΔT – изменение температуры. Это изменение периода вызывает соответствующее изменение угла дифракции согласно (1). По величине угла отклонения дифракционного пучка можно определить текущую температуру образца.

Зависимость изменения угла дифракции $\Delta\varphi$ от изменения температуры ΔT была получена из уравнений (1) и (2):

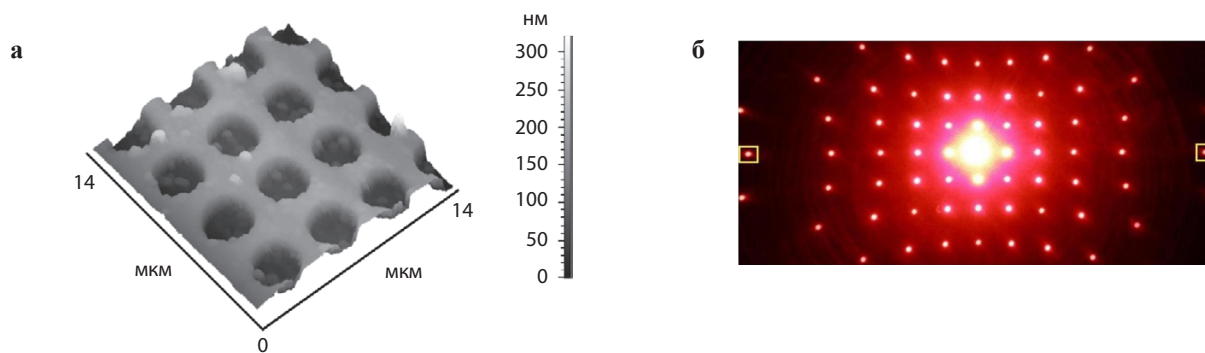


Рис. 1. Топография фазовой решётки образца, измеренная атомно-силовым микроскопом (а), и дифракционная картина, получаемая при зондировании данной решётки He-Ne лазером ($\lambda = 0.6328$ мкм) (б).

$$\Delta\varphi = \frac{k\lambda\alpha\Delta T}{\sqrt{d^2 - k^2\lambda^2}}, \quad (3)$$

а перемещение максимума Δx :

$$\Delta x = \Delta\varphi \cdot L, \quad (4)$$

где L – расстояние от образца до экрана.

Использование дифракционной решётки с малым периодом увеличивает чувствительность измерения температуры, как и регистрация высокого порядка дифракции. В связи с этим нами была изготовлена фазовая решётка с периодом $d = 4$ мкм, а регистрация сигналов проводилась в пятом порядке дифракции (рис. 1).

На рис. 2 представлена блок-схема установки для лазерной диагностики твёрдых тел при ИСО. На образец (3) с измерительной дифракционной решёткой, находящейся в реакционной камере (4) установки УОЛ.П-1 (1), подаётся пучок излучения зондирующего лазера ЛГН-111 (6). Через симметрично расположенные отверстия каме-

ры, пучки дифракционных максимумов пятого порядка попадают на отклоняющие зеркала (5). В исходном состоянии (до начала ИСО) пучки совмещаются на экране (8) вращением зеркал (5). Такая схема совмещения также компенсирует влияние вибрации образца на отклонение дифрагированных пучков. Экран представляет собой матированную с одной стороны стеклянную пластину с миллиметровой шкалой. Длина пути дифрагированного пучка от образца до экрана в нашей схеме составляет $L = 2315$ мм.

В процессе ИСО, по мере нагрева исследуемого образца на экране происходит отклонение дифракционных пучков в противоположные стороны на величину $2\Delta x$. Значение отклонения определяется температурой нагрева, а скорость их движения характеризует динамику роста или спада температуры. Динамика всего процесса регистрировалась нами цифровой камерой (9) с частотой съёмки до 30 кадров в секунду. Для ослабления фоновой засветки, идущей от ламп-вспышек, перед цифровой камерой помещался интерференционный светофильтр, а

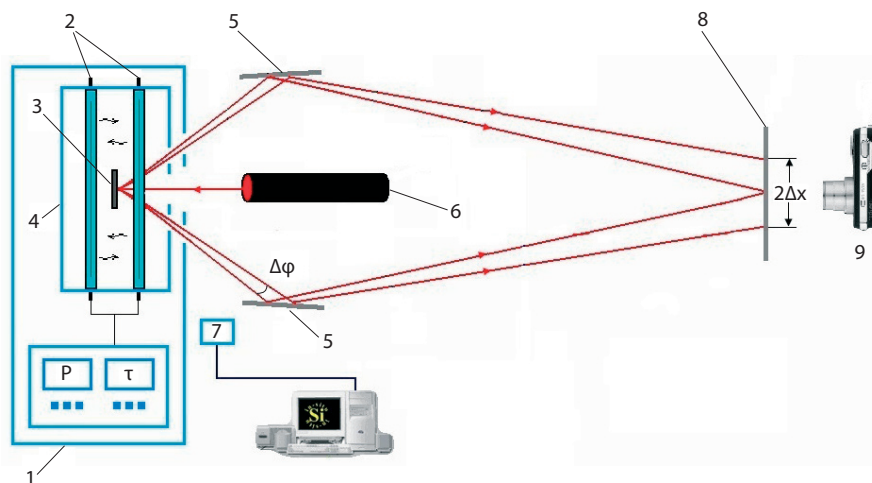


Рис. 2. Схема экспериментальной установки лазерной диагностики твёрдых тел при ИСО. 1 – Установка для ИСО УОЛ.П-1; 2 – три ксеноновые лампы-вспышки (две лампы расположены с передней стороны образца, одна лампа – с задней стороны); 3 – образец; 4 – реакционная камера; 5 – отражательные зеркала; 6 – He-Ne лазер ЛГН-111 ($\lambda = 0.6328$ мкм); 7 – фотодиод ФД-7; 8 – экран из матового стекла; 9 – цифровая камера.

на выходных отверстиях реакционной камеры располагались стеклянные светофильтры КС-14. Фотодиодом (7) регистрировалась форма светового импульса.

С целью отработки методики измерения температуры нагрева длительность светового импульса ИСО варьировалась в диапазоне от 120 мс до 5 с, а плотность мощности излучения от 50 до 1000 Вт/см².

Результаты и их обсуждение

Для получения численных данных о температуре была рассчитана теоретическая зависимость смещения на экране дифракционных максимумов $2\Delta x$ от изменения температуры ΔT по формулам (3) и (4). В расчётах была использована зависимость коэффициента теплового расширения от температуры $\alpha(T)$ из работы [7]. Начальная температура образца равнялась 90 °С. Эта температура несколько выше комнатной из-за нагрева образца излучением ламп-вспышек, работающих в дежурном режиме.

Анализ сдвига дифракционных максимумов на экране позволил оценить динамику изменения температуры в образце относительно временных параметров светового импульса.

На рис. 3 показаны кадры смещения дифракционных максимумов пятого порядка (а), а также расчётный и экспериментальный графики изменения температуры в результате нагрева монокристаллического кремния импульсом света длительностью $\tau_{\text{и}} = 3.49$ с при плотности мощности $P = 60$ Вт/см² (б) для данного режима.

Начало движения дифракционных максимумов практически совпадает с началом импульса света. Из графика видно, что через время нагрева $t = 2.5$ с наблюдается насыщение роста температуры образца $T = 1250$ °С, которая соответствует сдвигу на снимке $2\Delta x = 31$ мм. Наблюдаемое плато температуры в интервале от 2.5 с до

момента завершения светового импульса $\tau_{\text{и}} = 3.49$ с объясняется установлением равновесия между поглощаемой световой энергией и тепловым излучением нагретого образца. После завершения импульса света происходит процесс остывания образца, что ведёт к сближению дифракционных пучков.

Выводы

На основе дифракции Фраунгофера реализована на практике методика лазерной диагностики с целью комплексного исследования динамики изменения температуры и структурно-фазовых переходов на поверхности имплантированных полупроводников при импульсных световых воздействиях. Полученные результаты свидетельствуют, что разработанная методика позволяет регистрировать температуру образца непосредственно во время действия светового импульса. Для существенного увеличения чувствительности по температуре необходимо проводить измерения при предельных углах дифракции.

Методика измерения температуры является весьма полезной при изучении импульсных воздействий на твёрдое тело для широкого диапазона длительностей не только в случае его нагрева, но и в случае охлаждения. Например, при лазерном охлаждении твёрдого тела [8].

Кроме того, эта методика позволяет измерять коэффициент линейного расширения на образцах малого размера и может быть весьма полезной в dilatометрии.

Разработанная нами методика может иметь прикладное значение. Она позволяет создать технологию термической обработки имплантированных полупроводников с контролем и по температуре, и по факту завершения требуемого процесса рекристаллизации, не влияя на параметры подложки полупроводника.

Авторы выражают свою благодарность В. В. Зотову и А. А. Бухараеву за помощь в подготовке и тестировании

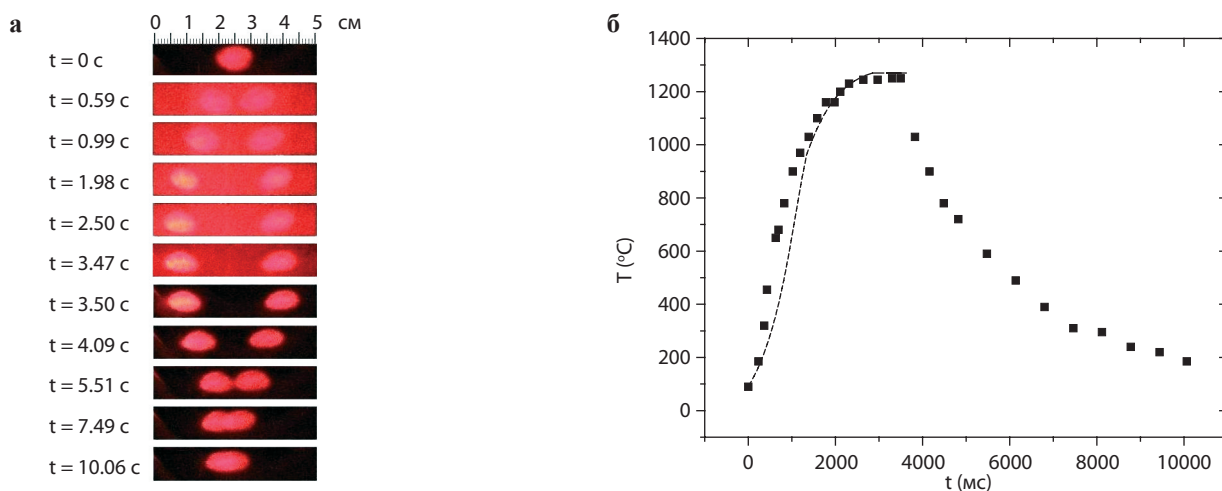


Рис. 3. а Динамика смещения дифракционных максимумов и б соответствующий график зависимости температуры от времени при импульсном нагреве: ■ – экспериментальные данные, (---) – теоретический расчёт.

образцов, С. А. Моисееву, В. В. Самарцеву, С. В. Петрушкину и И. А. Файзрахманову за полезные советы и обсуждения полученных результатов.

Литература

1. Фаттахов Я.В., Галяутдинов М.В., Львова Т.Н., Хайбуллин И.Б.: Оптика и спектроскопия **89**, № 1, 182–186 (2000)
2. Рывкин С.М., Салманов В.М., Ярощевский И.Д.: ФТТ **10**, вып. 4, 1022–1027 (1968)
3. Lo H.W., Compaan A.: J. Appl. Phys. **51**, no. 3, 1565–1572 (1980)
4. Галяутдинов М.Ф., Саинов Н.А., Хайбуллин И.Б., Штырков Е.И.: Способ определения температуры кристаллов при импульсном нагреве. Б.И. № 48, 307–309 (1983)
5. Магунов А.Н.: Лазерная термометрия твёрдых тел. М.: Физматлит 2001. 224 с.
6. DesAutels G.L., Power P., Brewer C., Walker M., Burky M., Anderson G.: Appl. Opt. **47**, no. 21, 3773–3777 (2008)
7. Okada Y., Tokumaru Y.: J. Appl. Phys. **56**, no. 2, 314–318 (1984)
8. Самарцев В.В., Петрушкин С.В.: Лазерное охлаждение твёрдых тел. М.: Физматлит 2005. 224 с.

Вклад обменного и диполь-дипольного взаимодействий в форму спектра ЭПР растворов нитроксильных радикалов

К. М. Салихов

Отдел химической физики, лаборатория квантовой динамики и квантовой информатики

На основе кинетических уравнений для поперечных компонент намагниченности электронных спинов нитроксильных радикалов в растворах с учётом бимолекулярного спинового обмена и диполь-дипольного взаимодействия предложен алгоритм нахождения вклада обменного и диполь-дипольного взаимодействий в уширение и сдвиг линий спектра ЭПР нитроксильных радикалов. Форма спектра ЭПР отражает только суммарный вклад этих взаимодействий. В работе показано, что из анализа формы спектра ЭПР радикалов, полученного в эксперименте, можно найти скорость W поперечной релаксации спинов, вызванной только диполь-дипольным взаимодействием спинов в воображаемых нитроксильных радикалах, в которых сверхтонкое взаимодействие неспаренного электрона с ядром атома азота отсутствует. С помощью этого W можно найти функцию корреляции, которая характеризует взаимную диффузию радикалов в конкретной изучаемой системе. Зная эту функцию корреляции, можно рассчитать вклад диполь-дипольного взаимодействия в фазовую релаксацию и перенос спиновой когерентности в реальной изучаемой системе.

Введение

Вклад обменного и диполь-дипольного взаимодействия в форму спектров ЭПР растворов парамагнитных частиц изучается уже более полувека. Поэтому могло бы показаться, что всё уже выяснено по этому вопросу. Однако выясняется, что это не совсем так. Что же происходит на самом деле? Существует общепринятая парадигма, которая сводится к следующему. Представим себе, что дан раствор двух парамагнитных частиц А и В с зеемановскими частотами ω_A , ω_B и концентрациями C_A и C_B , соответственно (для простоты будем предполагать, что $C_A = C_B$). Распространённая парадигма исходит из того, что поперечные компоненты намагниченности этих спинов описываются следующими кинетическими уравнениями:

$$\begin{aligned}\frac{\partial M_A^-}{\partial t} &= -i\omega_A M_A^- - M_A^-/T_{2d-d} - K_{ex} C M_A^- + K_{ex} C M_B^-, \\ \frac{\partial M_B^-}{\partial t} &= -i\omega_B M_B^- - M_B^-/T_{2d-d} - K_{ex} C M_B^- + K_{ex} C M_A^-, \quad (1)\end{aligned}$$

где $M^- = M_x - iM_y$, $\omega_{A,B} = g_{A,B}\beta B_0/\hbar$, g – g -фактор.

В этих уравнениях слагаемые, содержащие K_{ex} , описывают вклад обменного взаимодействия в фазовую релаксацию и перенос поперечной намагниченности (спиновой когерентности), а слагаемые, содержащие $1/T_{2d-d}$, описывают вклад диполь-дипольного взаимодействия. Из этих уравнений следует, что в области медленного обмена спиновый обмен и диполь-дипольное взаимодействие уширяют линии спектра ЭПР частиц А и В на величину

$$\Delta\Omega = 1/T_{2d-d} + K_{ex} C. \quad (2)$$

Как показывает уравнение (1), обменное взаимодействие вызывает также перенос когерентности. Благодаря этому, в области медленного спинового обмена происходит сдвиг линий спектра ЭПР к центру спектра и в области быстрого спинового обмена происходит коллапс спектра в одну узкую линию в центре тяжести спектра. Вклад обменного переноса когерентности в ширину спектра в области быстрого обмена равен

$$\Delta\Omega_{ex} = (\omega_A - \omega_B)^2/8K_{ex}C. \quad (3)$$

Из анализа экспериментальных данных по ширине линий ЭПР в области медленного обмена (2), по ширине спектра в области быстрого обмена (3), а также по сдвигу линий в области медленного обмена можно найти вклады обменного и диполь-дипольного взаимодействий в спиновую динамику растворов.

Однако, в ряде работ было отмечено, что ситуация на самом деле более сложная. Во-первых, благодаря переносу когерентности (переносу поперечной намагниченности) в области медленного обмена линии спектра могут стать несимметричными, их уже нельзя представлять в виде, например, лоренцевой линии поглощения, появляется вклад в форме дисперсии [1, 2]. Благодаря этому, положение линии ЭПР смещается, и это надо учитывать при интерпретации сдвига линий спектра ЭПР. Такое искажение формы линии в спектре ЭПР влияет также и на измеряемую в эксперименте ширину линии. В области медленного обмена ширина линии, определяемая как расстояние между экстремумами производной спектра, оказывается больше величины $\Delta\Omega$ в уравнении (2). Во-вторых, кинетические уравнения (1) принципиально неверно описывают вклад диполь-дипольного взаимодействия в спиновую динамику растворов парамагнитных частиц. Согласно (1) ожидается, что

обменное и диполь-дипольное взаимодействия должны совершенно по-разному проявляться в спектрах ЭПР, так как обменное взаимодействие вызывает перенос когерентности, т.е. спиновый обмен вызывает сдвиг линий в области медленного обмена и коллапс всех линий в одну узкую линию в области быстрого обмена, в то время как диполь-дипольное взаимодействие не индуцирует перенос когерентности, а только уширяет каждую компоненту спектра [3, 4]. Как было показано в работах [5, 6], на самом деле диполь-дипольное взаимодействие также вызывает перенос спиновой когерентности. В-третьих, прецессия спинов в области эффективного обменного взаимодействия при столкновениях парамагнитных частиц вызывает дополнительный сдвиг линий [1, 7]. Указанные обстоятельства существенно усложнили задачу извлечения вкладов обменного и диполь-дипольного взаимодействий из анализа наблюдаемых в эксперименте изменений формы спектра ЭПР [4].

В этой работе предлагается алгоритм определения вклада обменного и диполь-дипольного взаимодействий в фазовую релаксацию и в перенос спиновой когерентности в разбавленных растворах нитроксильных радикалов. Интерес к этим системам связан с тем, что нитроксильные радикалы используются в качестве парамагнитных зондов (меток). Измерения константы скорости спинового обмена используются для определения частоты двойных столкновений в сложных биологических системах, для определения концентрации кислорода (оксиметрия) и т.д.

Кинетические уравнения

Учитывая большой интерес исследователей к нитроксильным радикалам, в этой работе рассмотрены радикалы как с ^{14}N , так и с ^{15}N изотопами азота. Например, для растворов ^{14}N нитроксильных радикалов кинетические уравнения для поперечных компонент электронной намагниченности радикалов, в которых ядерный спин имеет проекцию $-1/2$ (подансамбль 1) и $+1/2$ (подансамбль 2), имеют вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial M_1^-}{\partial t} &= -i(\omega_0 - a/2 + b_{\text{lex}}C - \omega)M_1^- - M_1^-/T_{21} \\ &\quad - W_1CM_1^- + V_1CM_2^- - i\omega_1M_0, \\ \frac{\partial M_2^-}{\partial t} &= -i(\omega_0 + a/2 - b_{\text{lex}}C - \omega)M_2^- - M_2^-/T_{22} \\ &\quad - W_1CM_2^- + V_1CM_1^- - i\omega_1M_0. \end{aligned} \quad (4)$$

В этих уравнениях a – константа сверхтонкого взаимодействия, члены, содержащие параметр b_{lex} , описывают сдвиг частоты ЭПР, вносимый обменным взаимодействием, C – концентрация радикалов, M_0 – продольная компонента намагниченности подансамбля спинов. СВЧ-поле (B_1) имеет частоту ω . Частота нутации $\omega_1 = g\beta B_1/\hbar$, T_{21} и T_{22} – времена поперечной релаксации двух подансамблей спинов без учёта вкладов спинового обмена и диполь-

дипольного взаимодействия. Слагаемые, содержащие W и V , описывают потерю спиновой когерентности (фазовой релаксации, W) и перенос спиновой когерентности (V), вызванные обменным и диполь-дипольным взаимодействиями. Эти слагаемые пропорциональны концентрации (C) радикалов. Концентрация радикалов считается достаточно низкой, чтобы можно было пренебречь тройными столкновениями радикалов.

Константы скоростей W и V содержат вклады обменного и диполь-дипольного взаимодействий:

$$\begin{aligned} W_1 &= W_{\text{lex}} + W_{\text{1d-d}}, \\ V_1 &= V_{\text{lex}} + V_{\text{1d-d}}, \end{aligned} \quad (5)$$

где

$$W_{\text{lex}} = V_{\text{lex}} = (1/2)K_{\text{ex}}. \quad (6)$$

Коэффициент $1/2$ в (6) появляется из-за того, что в столкновениях спинов, принадлежащих одному и тому же подансамблю, обменное взаимодействие не проявляется. Ситуация другая для диполь-дипольного взаимодействия: в фазовую релаксацию вносят вклад столкновения не только между радикалами из разных подансамблей ($W_{\text{2d-d}}$), но и между радикалами из одного и того же подансамбля ($W_{\text{1d-d}}$). Согласно [3] имеем

$$W_{\text{1d-d}} = W_{\text{1d-d}} + W_{\text{2d-d}}, \quad (7)$$

где

$$\begin{aligned} W_{\text{1d-d}} &= \frac{1}{2}\kappa^2 \left(\frac{3}{8}J^{(2)}(2\omega_0) + \frac{15}{4}J^{(1)}(\omega_0) + \frac{3}{8}J^{(0)}(0) \right), \\ W_{\text{2d-d}} &= \frac{1}{2}\kappa^2 \left(\frac{3}{8}J^{(2)}(2\omega_0) + \frac{9}{4}J^{(1)}(\omega_0) + \frac{5}{24}J^{(0)}(0) \right), \\ W_{\text{1d-d}} &= W_{\text{1d-d}} + W_{\text{2d-d}} = \kappa^2 \left(\frac{3}{8}J^{(2)}(2\omega_0) + 3J^{(1)}(\omega_0) \right. \\ &\quad \left. + \frac{7}{24}J^{(0)}(0) \right), \\ \kappa^2 &= S(S+1)g^4\beta^4/\hbar^2. \end{aligned}$$

В этих выражениях $J^{(n)}(\omega)$ – спектральная плотность функции корреляции диполь-дипольного взаимодействия.

Вклад диполь-дипольного взаимодействия в перенос спиновой когерентности даётся уравнением [5, 6]

$$V_{\text{1d-d}} = -\frac{1}{2}\kappa^2 \left(\frac{3}{2}J^{(1)}(\omega_0) + \frac{1}{6}J^{(0)}(0) \right). \quad (8)$$

Надо подчеркнуть, что константа скорости переноса когерентности в (8) имеет отрицательный знак, противоположный знаку константы скорости переноса

когерентности за счёт обменного взаимодействия. В суммарной константе скорости переноса когерентности V_1 (уравнение (5)), вклады обменного и диполь-дипольного взаимодействий частично компенсируют друг друга. В зависимости от конкретных значений магнитно-резонансных и молекулярно-кинетических параметров радикалов может преобладать вклад обменного взаимодействия (тогда $V_1 > 0$) или вклад диполь-дипольного взаимодействия (и тогда $V_1 < 0$). Как показано в работах [5, 6], при $V_1 < 0$ в области быстрого переноса спиновой когерентности наступает коллапс линий в одну однородно-уширенную линию также, как и в случае $V_1 > 0$. Но есть и принципиальное отличие между этими ситуациями. В случае $V_1 < 0$ не происходит эффекта сужения спектра с ростом величины V_1C .

Отметим, что в (4) слагаемые, содержащие параметр b_{1ex} , описывают сдвиг линий, предсказанный в [1, 7].

Форма спектра ЭПР

Стационарное решение уравнения (4) даёт форму спектра ЭПР. В области $|V_1|C < |a|$, спектр ЭПР описывается формулой

$$J = T_{2ef} \left[\frac{1 - (2V_1C/a)(\omega_0 - a/2 + b_{1ex}C + V_1^2C^2/a - \omega)T_{21ef}}{1 + (\omega_0 - a/2 + b_{1ex}C + V_1^2C^2/a - \omega)^2T_{21ef}^2} + \frac{1 + (2V_1C/a)(\omega_0 + a/2 - b_{1ex}C - V_1^2C^2/a - \omega)T_{22ef}}{1 + (\omega_0 + a/2 - b_{1ex}C - V_1^2C^2/a - \omega)^2T_{22ef}^2} \right]. \quad (9)$$

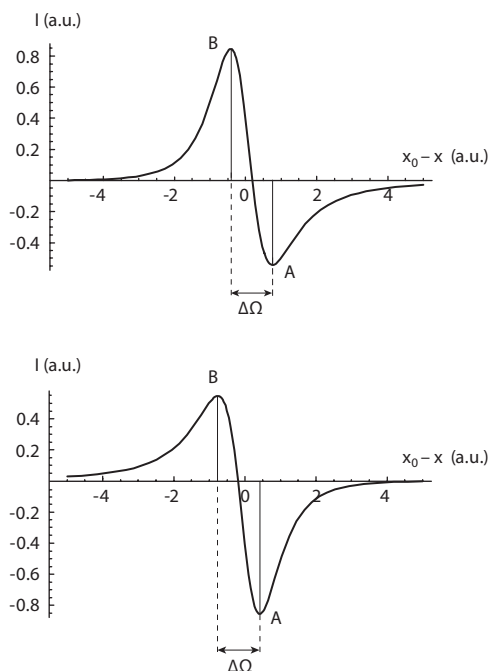


Рис. 1. Спектры ЭПР радикала с ^{15}N изотопом азота, рассчитанные согласно уравнения (10), для $p = 0.4$ (верхняя кривая) и $p = -0.4$ (нижняя кривая), $x_0 = 0$ (представлены производные j по отношению к x).

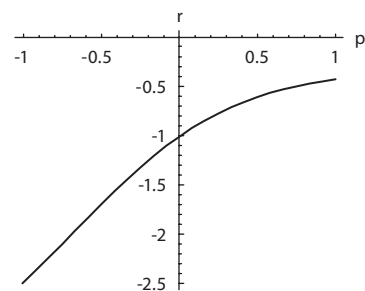


Рис. 2. Зависимость отношения амплитуд спектра в точках экстремумов, $r = A/B$ (см. рис. 1), от параметра p .

Из (9) видно, что спектр представляет сумму двух линий. Обе эти линии имеют асимметричную форму, их форма даётся суперпозицией лоренцевой линии поглощения J_A и линии дисперсии J_D ,

$$j = \tau \left[\frac{1}{1 + (x_0 - x)^2\tau^2} + \frac{p(x_0 - x)\tau}{1 + (x_0 - x)^2\tau^2} \right] \equiv J_A + pJ_D. \quad (10)$$

В случае ^{15}N радикала параметр асимметрии p равен $|p| = 2|V_1C/a| < 1$. Из-за асимметрии (рис. 1) положение максимумов линий смещаются на величину

$$\Delta\omega_{as} = \pm a \frac{\sqrt{1 + (2V_1C/a)^2} - 1}{2V_1CT_{2ef}},$$

где $T_{2n\text{ef}} = T_{2n}/(1 + W_1CT_{2n})$, $n = 1, 2$.

Ширина линий (расстояние между экстремумами производной спектра) также зависит от параметра асимметрии линий. В работе найдено аналитическое выражение для этой зависимости. Важной характеристикой асимметричной линии является отношение амплитуд экстремальных значений производной линии спектра. Показано, что это отношение зависит только от параметра p . Измерив в эксперименте отношение этих амплитуд, можно найти величину p с помощью графика, представленного на рис. 2.

Аналогичным образом был проведён анализ формы спектра ЭПР ^{14}N нитроксильных радикалов. Получены формулы, которые описывают сдвиг и ширину линий в области медленного переноса спиновой когерентности.

Вклад обменного и диполь-дипольного взаимодействий

Форма спектров ЭПР (сдвиги и ширина линий) определяются двумя кинетическими параметрами: скоростью фазовой релаксации спинов W_1C и скоростью переноса когерентности V_1C (см., например, уравнение (4)). Из анализа полученных в эксперименте спектров ЭПР можно найти константы скоростей этих процессов W_1 и V_1 .

Каждая из этих констант скорости представляет собой сумму вкладов обменного и диполь-дипольного взаимодействий. Как уже отмечалось во введении, из данных ЭПР сравнительно просто можно было бы найти отдельно вклады обменного и диполь-дипольного взаимодействий, если бы диполь-дипольное взаимодействие не вносило вклада в перенос спиновой когерентности. Но это не так, поэтому мы сталкиваемся с проблемой разделения вкладов двух взаимодействий. Решению этой задач может помочь следующее наблюдение. Величина

$$W = W_1 - V_1 = \kappa^2 \left(\frac{3}{8} J^{(2)}(2\omega_0) + \frac{15}{4} J^{(1)}(\omega_0) + \frac{3}{8} J^{(0)}(0) \right) \quad (11)$$

не содержит вклада обменного взаимодействия, она определяется только диполь-дипольным взаимодействием. Более того, W в (11) равна скорости фазовой релаксации, вызванной диполь-дипольным взаимодействием, для вообразимых нитроксильных радикалов, в которых сверхтонкое взаимодействие с магнитным ядром азота как бы выключено и поэтому все радикалы имеют одинаковую резонансную частоту. Спектральные плотности $J^{(n)}(\omega)$ рассчитаны для нескольких моделей взаимной диффузии (см., например, [3–5, 8–10]). Сопоставляя найденные в эксперименте данные по зависимости W от вязкости раствора, частоты СВЧ-поля с результатами модельных расчётов, можно сделать выбор модели диффузии радикалов. Затем для выбранной модели диффузии можно рассчитать вклад диполь-дипольного взаимодействия в фазовую релаксацию W_{d-d} (см., например, уравнение (7)) и в перенос спиновой когерентности V_{d-d} (см., например, уравнение (8)).

Вклад обменного взаимодействия в кинетические параметры спинового движения (см., например, уравнение (4)) можно найти путём вычитания рассчитанного таким образом вклада диполь-дипольного взаимодействия из суммарного значения кинетических параметров, которые определяются из анализа спектров ЭПР (см., например, уравнение (5)).

Заключение

Таким образом, показано, что невозможно разделить вклад обменного и диполь-дипольного взаимодействий в фазовую релаксацию и перенос спиновой когерентности растворов парамагнитных частиц только из экспериментальных данных по форме спектра ЭПР, по изменениям формы спектра при изменении концентрации спинов, вязкости раствора, частоты СВЧ-поля. Для разделения этих вкладов приходится привлекать модельные расчёты. Достаточно рассчитать вклад одного из этих взаимодействий, так как их суммарный вклад можно найти непосредственно из экспериментальных данных. В принципе, можно считать либо вклад обменного взаимодействия, либо диполь-дипольного. По-видимому, целесообразно рассчитывать дипольный вклад, так как в этом случае известен гамильтониан взаимодействия, неизвестным является кинематика диффузии радикалов. В случае обменного взаимодействия неизвестным является как кинематика движения радикалов, так и обменный интеграл.

Стимулом для этой работы явилась статья [4], в которой предпринята весьма обстоятельная попытка разделить вклады обменного и диполь-дипольного взаимодействий в спиновую динамику растворов нитроксильных радикалов. Результаты работы были доложены на 7-ом съезде Европейской федерации ЭПР-групп, который состоялся в сентябре 2009 г. в Антверпене (Бельгия). Подробное изложение этой работы содержится в статье, которая послана в печать.

Литература

1. Замаев К.И., Молин Ю.Н., Салихов К.М.: Спиновый обмен. Новосибирск: Наука, Сибирское отд-ние 1977. 317 с.
2. Molin Yu.N., Salikhov K.M., Zamaraev K.I.: Spin exchange. Principles and applications in chemistry and biology. Verlag, Heidelberg, Berlin, New York: Springer 1980. 242 p.
3. Абрагам А.: Ядерный магнетизм. М.: ИЛ 1963. 552 с.
4. Bales B.L., Meyer M., Smith S., Peric M.: J. Phys. Chem. A **113**, 4930–4940 (2009)
5. Салихов К.М., Семёнов А.Г., Цветков Ю.Д.: Электронное спиновое эхо и его применение. Новосибирск: Наука, Сибирское отд-ние 1976. 343 с.
6. Галеев Р.Т., Салихов К.М.: Хим. физика **15**, 48–64 (1996)
7. Salikhov K.M.: J. Magn. Reson. **63**, 271–279 (1985)
8. Freed J.H.: Chem. Phys. **45**, 3452–3453 (1966)
9. Hwang L.-P., Freed J.H.: J. Chem. Phys. **63**, 4017–4025 (1975)
10. Freed J.H.: J. Chem. Phys. **68**, 4034–4037 (1978)

Моделирование квантовой телепортации в реакционных центрах фотосинтеза

Ю. Е. Кандрашкин, К. М. Салихов

Отдел химической физики, лаборатория квантовой динамики и информатики

Проведено численное исследование процесса квантовой телепортации электронных спинов в модифицированных реакционных центрах фотосинтеза, в которых внедрён дополнительный стабильный радикал. Эффективность телепортации исследовалась по форме и интенсивности сигнала первичного спинового эха. Проведённый анализ выявил роль различных факторов, влияющих на перенос начального состояния и его наблюдение средствами импульсного электронного парамагнитного резонанса. Исследования позволили сформулировать требования к таким характеристикам, как скорость реакций рекомбинации, величинам зеемановских и спин-спиновых взаимодействий для проведения эффективной телепортации. Предложена модифицированная схема телепортации, включающая в себя реакцию рекомбинации.

Введение

В работе Ч. Беннета с соавторами [1] было показано, что квантовое состояние объекта может быть полностью передано другому объекту. Этот процесс, известный как квантовая телепортация, играет ключевую роль в квантовой информатике. Протокол квантовой телепортации использует свойство нелокальности пары Эйнштейна-Подольского-Розена (ЭПР) [2]. Для телепортации квантового бита информации (кубита) А отправитель Алиса и получатель Боб используют ЭПР-пару (ВС), причём одна часть этой пары (В) находится у Алисы, а вторая (С) – у Боба. Для того, чтобы телепортировать состояние кубита А, Алиса производит измерение в базисе запутанных состояний пары АВ. В результате измерения начальное состояние кубита А разрушается, но при этом Алиса получает информацию о совместном состоянии пары АВ. Полученный результат передаётся Бобу классическим способом. Зная совместное состояние пары АВ, Боб может полностью восстановить исходное состояние кубита А на своём кубите С.

Полная или частичная квантовая телепортация была реализована на различных объектах: фотонах [3–7], ядерных спинах [8] и ионных ловушках [9, 10]. В работе [11] была предложена схема реализации квантовой телепортации на электронных спинах в модифицированных реакционных центрах фотосинтеза, в которых внедрён дополнительный стабильный радикал, служащий в качестве кубита А. Лазерный импульс генерирует радикальную пару ВС, которая находится в запутанном синглетном состоянии. Схема проведения эксперимента на электронных спинах представлена на рис. 1.

Процедура квантовой телепортации включает следующие этапы:

1. Формирование когерентного состояния спина свободного радикала А, внедрённого в реакционный центр фотосинтеза, с помощью первого СВЧ-импульса.

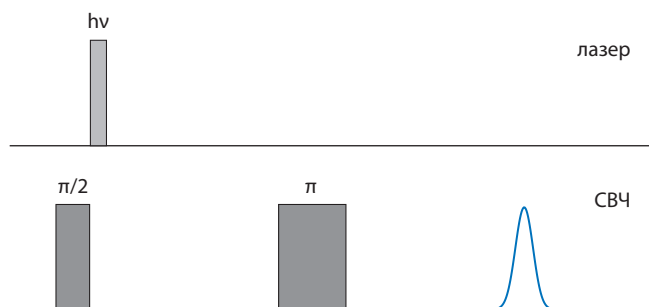


Рис. 1. Схема импульсной последовательности для эксперимента по наблюдению квантовой телепортации на электронных спинах. Стадия приготовления системы включает два импульса: первый СВЧ-импульс создаёт поперечную намагниченность на спине А, а лазерный импульс формирует радикальную пару ВС в синглетном состоянии. Второй СВЧ-импульс подаётся с задержкой τ на резонансной частоте спина С. Оба СВЧ-импульса поворачивают спины вдоль оси x . Второй СВЧ-импульс формирует спиновое эхо от спина С в момент времени 2τ . Фаза и амплитуда спинового эха на спине С, в случае успешной телепортации, должна воспроизвести состояние спина А после этапа приготовления системы.

2. Генерация ион-радикальной пары ВС лазерным импульсом. За время порядка наносекунды электрон перемещается на акцептор С, который находится на расстоянии порядка 3 нм. Эта реакция идёт через синглетное возбуждённое состояние донора В, поэтому пара ВС рождается в максимально-перепутанном (синглетном) состоянии.

3. Предполагается, что стабильный радикал А внедрён таким образом, чтобы пара АВ в синглетном состоянии смогла рекомбинировать в наносекундном интервале: $(A^{\cdot-}B^+)^{SC^-} \rightarrow C^{\cdot-}$. Эта реакция проектирует состояние пары АВ в базис запутанных состояний Белла.

4. Процесс рекомбинации синглетных пар АВ формирует на спине С точно такое же состояние, которое

было у спина А до рекомбинации. Спины С в триадах с триплетными парами АВ имеют противоположный знак намагниченности. Для удобства, те реакционные центры, в которых пары АВ успели прорекомбинировать, мы назовём подансамблем 1, а непрорекомбинировавшие центры – подансамблем 2.

5. Подансамбль 1 содержит только один вид неспаренных спинов, в то время как подансамбль 2 – три неспаренных электрона. Благодаря спин-спиновым взаимодействиям, развитие спиновой системы в этих подансамблях отличается. Следовательно, в экспериментах ЭПР можно выделить сигнал только от спинов С подансамбля 1, т.е. зарегистрировать акт квантовой телепортации.

В данной работе представлены некоторые результаты численного эксперимента, согласно изложенному выше протоколу, и рассмотрено влияние основных параметров на качество наблюдения квантовой телепортации. Более

полное изложение влияния различных факторов представлено в работе [12].

Результаты и обсуждение

Сразу после приготовления спиновая система имеет следующую матрицу плотности:

$$\rho_{ABC}(0_+) = -S_{A,y} |S_{BC}\rangle \langle S_{BC}|. \quad (1)$$

Здесь предполагается, что первый СВЧ-импульс действует вдоль оси x и создаёт когерентное состояние спина А, а лазерный импульс формирует радикальные пары ВС в синглетном состоянии. Это выражение удобно переписать в базисе синглетной и триплетных волновых функций пары ВС:

$$\rho_{ABC}(0_+) = \frac{i}{4} \begin{pmatrix} iS_{C,y} & (\frac{1}{2} - S_{C,z})/\sqrt{2} & -S_{C,x} & (\frac{1}{2} + S_{C,z})/\sqrt{2} \\ -(\frac{1}{2} - S_{C,z})/\sqrt{2} & 0 & (\frac{1}{2} - S_{C,z})/\sqrt{2} & -S_{C,x} + iS_{C,y} \\ S_{C,x} & -(\frac{1}{2} - S_{C,z})/\sqrt{2} & -iS_{C,y} & (\frac{1}{2} + S_{C,z})/\sqrt{2} \\ -(\frac{1}{2} + S_{C,z})/\sqrt{2} & S_{C,x} + iS_{C,y} & -(\frac{1}{2} + S_{C,z})/\sqrt{2} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} |S_{AB}\rangle \\ |T_{AB,+1}\rangle \\ |T_{AB,0}\rangle \\ |T_{AB,-1}\rangle \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Анализ протокола телепортации, представленного на рис. 1, показывает, что в пределе высоких скоростей спин-селективной реакции рекомбинации пары АВ, практически сразу после лазерного импульса число прорекомбинировавших (ансамбль 1) и непрорекомбинировавших (ансамбль 2) троек АВС соотносится как один к трём. Это отношение отражает количество синглетных и триплетных пар АВ после приготовления системы. Из уравнения (2) видно, что намагниченность спинов С в подансамбле 1 сразу после рекомбинации синглетных пар АВ имеет такую же фазу, что и намагниченность спинов А после первого СВЧ-импульса. В то же время спины С подансамбля 2 находятся в противофазе.

Дальнейшая эволюция системы описывается кинетическими уравнениями:

$$\begin{aligned} \partial_t \rho_I &= -i[H_I(t), \rho_I] + \text{Tr}_{AB}(P_{AB} \cdot \rho_{II} + \rho_{II} \cdot P_{AB}), \\ \partial_t \rho_{II} &= -i[H_{II}(t), \rho_{II}] - (P_{AB} \cdot \rho_{II} + \rho_{II} \cdot P_{AB}), \\ \rho_I(0) &= 0, \quad \rho_{II}(0) = \rho_0. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь оператор P_{AB} описывает спин-селективную рекомбинацию пары АВ:

$$P_{AB} = \frac{1}{2} \left(k_S |S_{AB}\rangle \langle S_{AB}| + \sum_{m=-1,0,+1} k_{T,m} |T_{AB,m}\rangle \langle T_{AB,m}| \right). \quad (4)$$

Спиновая динамика подансамблей 1 и 2 определяется спин-гамильтонианами H_I и H_{II} , соответственно. Подан-

самбль 1, по определению состоит из троек, в которых пара АВ прорекомбинировала, и содержит только один вид неспаренных электронов. Поэтому спин-гамильтониан подансамбля 1 включает только взаимодействие с постоянным магнитным полем и сверхтонкое взаимодействие с магнитными ядрами:

$$\begin{aligned} H_I &= H_{Z,C} + a_C S_{C,z}, \\ H_{Z,R=A,B,C} &= \mu_B \vec{B}_0 \mathbf{g}_R \vec{S}_R = \omega_R S_{R,z}. \end{aligned} \quad (5)$$

Спин-гамильтониан подансамбля 2, кроме части, учитывающей зеемановское и сверхтонкое взаимодействия, содержит также обменную (J_{RP}) и секулярную части диполь-дипольных (d_{RP}) взаимодействий всех трёх радикалов системы:

$$\begin{aligned} H_{II} &= \sum_{R=A,B,C} (\omega_R S_{R,z} + a_R S_{R,z}) + \sum_{RP=AB,AC,BC} H_{SS,RP}, \\ H_{SS,RP} &= 2J_{RP} \vec{S}_R \vec{S}_P + d_{RP} (3 \cos \theta_{RP} - 1) \\ &\quad \times (2S_{R,z} S_{P,z} - S_{R,x} S_{P,x} - S_{R,y} S_{P,y}). \end{aligned} \quad (6)$$

Здесь θ_{RP} – угол между осью внешнего магнитного поля $\mathbf{B}_0$ и радиус-вектором, соединяющим радикальные пары.

Согласно уравнению (2), сразу после этапа приготовления спин С в подансамблях 1 и 2 имеет противоположные намагниченности, и поэтому полный сигнал

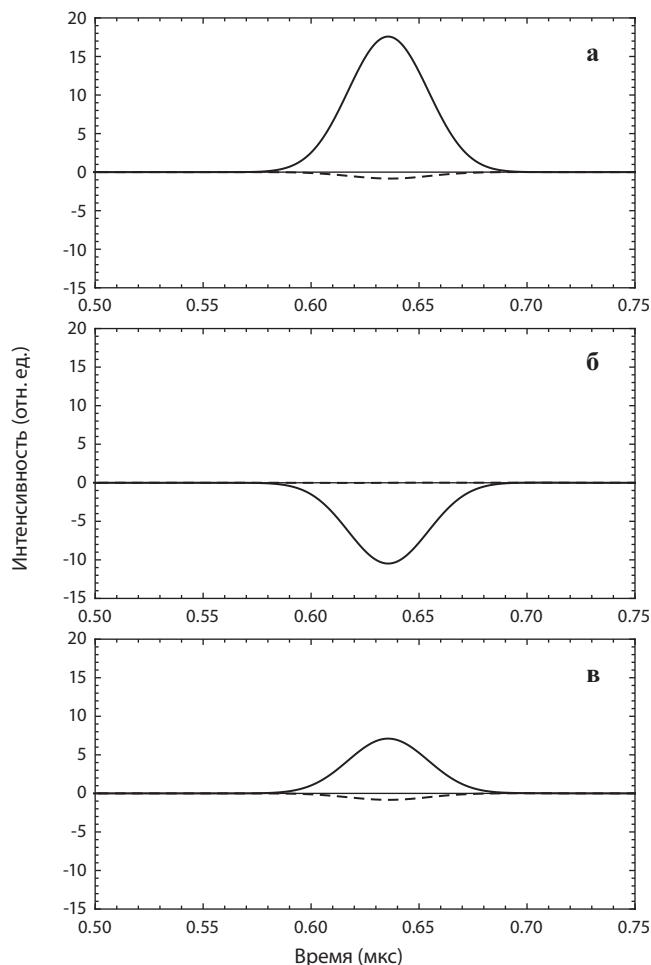


Рис. 2. Сигналы ЭСЭ, смоделированные для времени задержки $\tau = 300$ нс. **а** и **б** Вклад от спина С подансамблей 1 и 2, соответственно. **в** Суммарный сигнал от спинов С обоих подансамблей. Сплошной линией обозначена компонента намагниченности вдоль оси u , штриховой линией – вдоль оси x . Ненулевые параметры моделирования включают следующие значения: резонансные поля для спинов А и В, $\omega_A = \omega_B = 3403$ мТл, для спина С, $\omega_C = 3408$ мТл; ширины распределения локальных полей для спинов А, В и С, соответственно, $a_A = 0.35$, $a_B = 0.4$ и $a_C = 0.35$ мТл; величины обменных взаимодействий спинов в парах АВ и ВС, соответственно, $J_{AB} = 0.3$ и $J_{BC} = 0.1$ мТл; амплитуда СВЧ-поля $\omega_1 = 0.5$ мТл; скорость рекомбинации синглетных пар АВ $k_s = 1$ нс $^{-1}$.

электронного спинового эха (ЭСЭ) от этого спина равняется нулю. Однако, благодаря наличию спин-спиновых взаимодействий в подансамбле 2, эволюция спина С в двух подансамблях будет неодинаковой. На рис. 2 показан сигнал ЭСЭ для W-диапазона, смоделированный для задержки между двумя СВЧ-импульсами, равной 300 нс. Рисунки 2а и 2б демонстрируют вклад в эхо отдельных подансамблей системы, 1 и 2, соответственно. На рис. 2в представлен суммарный вклад от спинов С, который и должен наблюдаться в эксперименте. Компоненты намагниченности вдоль осей x и u показаны штриховой и сплошной линиями, соответственно. При моделировании сигнала эха предполагалось, что первый СВЧ-импульс приложен вдоль оси x , так что в результа-

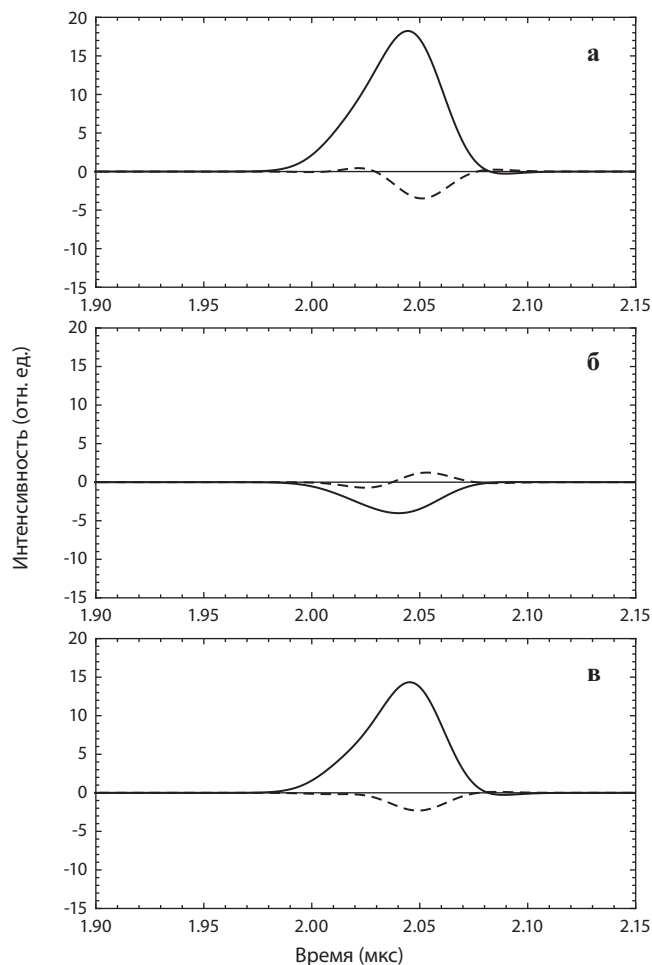


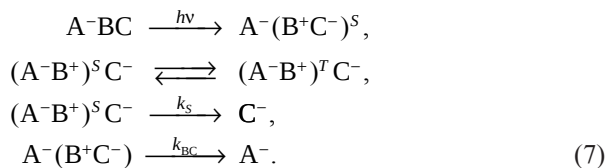
Рис. 3. Сигналы ЭСЭ, смоделированные для времени задержки $\tau = 1$ мкс. **а** и **б** Вклад от спина С подансамблей 1 и 2, соответственно. **в** Суммарный сигнал от спинов С обоих подансамблей. Сплошной линией обозначена компонента намагниченности вдоль оси u , штриховой линией – вдоль оси x . Все параметры моделирования, за исключением времени задержки, имеют такие же значения, как и для рис. 2.

те намагниченность спина А становится направленной противоположно оси u . Второй импульс подаётся на резонансной частоте спина С, $\omega_C = 3408$ мТл. Амплитуда СВЧ-поля равна 0.5 мТл, и поэтому действие второго СВЧ-импульса слабо отражается на спинах А и В с резонансными частотами, равными $\omega_A = \omega_B = 3403$ мТл. Таким образом, основной вклад в сигнал эха идёт от спинов С. Сигнал от спинов А и В может проявиться как модуляция формы эха, и может быть устранён сужением окна детектируемых частот.

На рис. 2а показан сигнал эха от подсистемы 1. Этот сигнал соответствует намагниченности спинов С, которые унаследовали состояние спинов А сразу после рекомбинации системы. Однако полный сигнал эха (рис. 2в) существенно меньше вклада только от подсистемы 1 из-за присутствия сигнала от подсистемы 2, показанного на рис. 2б. Пары АВ подансамбля 2 могут переходить в синглетное состояние за счёт триплет-синглетных переходов и рекомбинировать. Этот процесс уменьшает

количество триад в подансамбле 2, и, следовательно, его вклад в сигнал эха. Поэтому наблюдение на коротких временах задержки может быть проблематично из-за слабой интенсивности суммарного сигнала. Можно ожидать, что увеличение времени задержки приведёт к уменьшению сигнала от подансамбля 2. На рис. 3 представлен результат моделирования для времени задержки $\tau = 1$ мкс. Все остальные параметры вычисления рис. 2 и 3 совпадают. Видно, что, действительно, вклад от подансамбля 2 уменьшился (сравни рис. 2б и 3б). Однако, вклад от триад ABC с начальным триплетным состоянием пары AB, которые смогли прорекомбинировать за время задержки, изменил форму сигнала эха подансамбля 1 (рис. 3а). Это влияние также заметно и на суммарном сигнале (рис. 3в). Таким образом, увеличение времени задержки повысило интенсивность сигнала, но изменило его фазу и форму. Полученные выше результаты показывают, что квантовая телепортация может быть зарегистрирована в экспериментах ЭСЭ. Однако в зависимости от магнитно-резонансных параметров наблюдаемой системы необходим поиск баланса между интенсивностью наблюдаемого сигнала и точностью переноса состояния спина A.

В модифицированных реакционных центрах фотосинтеза электрон, находящийся на акцепторе, имеет ненулевую вероятность обратного перехода с образованием нейтральной молекулы донора. Таким образом, расширенная кинетическая схема включает в себя два конкурирующих канала реакции рекомбинации триад ABC:



Согласно этой схеме, синглетные пары AB быстро рекомбинируют с константой скорости k_S . Этот процесс формирует подансамбль 1, в котором на спинах C воспроизводится исходное состояние спинов A. Практически все пары AB подансамбля 2 сразу после лазерного импульса будут иметь триплетный характер. За счёт триплет-синглетных переходов они могут перейти в синглетное состояние и рекомбинировать. Однако, согласно уравнению (7), имеется другой путь реакции. Это рекомбинация пары BC, в результате которого остаётся единственный неспаренный спин A. Данный процесс будет доминирующим при условии, что скорость рекомбинации k_{BC} будет больше скорости триплет-синглетных переходов пары AB. Скорость триплет-синглетных переходов в рассматриваемой системе пропорциональна разности частот прецессии спинов пары AB, а также времени жизни синглетных пар AB. Как видно из сравнения рис. 2 и 3, эта скорость достаточно маленькая. Поэтому для формирования конкурирующего механизма достаточно иметь время жизни пары BC в

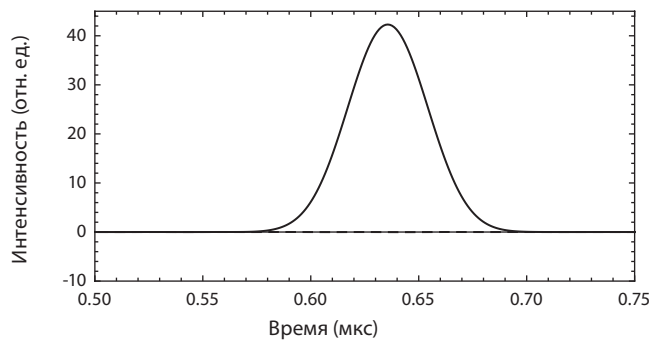


Рис. 4. Сигнал ЭСЭ от неспаренных спинов C подансамбля 1, рассчитанный согласно кинетической схеме (7). Сплошной линией обозначена компонента намагниченности вдоль оси y, штриховой линией — вдоль оси x. Скорость спин-селективной рекомбинации пары AB $k_S = 10$ нс⁻¹, а скорость рекомбинации пары BC $k_{BC} = 0.05$ нс⁻¹. Все остальные параметры моделирования имеют такие же значения, как и для рис. 2.

пределах 100 нс, которое характерно для времён жизни модифицированных реакционных центров фотосинтеза. Таким образом, предложенная выше схема обеспечивает разделение исходных триад ABC по типу состояния пары AB. Триады с синглетными парами AB будут преимущественно формировать неспаренные спины C на акцепторе, которые будут наследовать состояние спинов A сразу после этапа приготовления. Триады с триплетными парами AB будут формировать исходную систему с единственным неспаренным электроном A.

Результат моделирования телепортации, согласно схеме (7), показан на рис. 4. Все параметры расчёта, за исключением скоростей реакций рекомбинации, соответствуют параметрам, использованным для получения рис. 2. Скорости реакций рекомбинации равны $k_S = 10$ нс⁻¹ и $k_{BC} = 0.05$ нс⁻¹. По сравнению с рис. 2 здесь приведён только вклад в сигнал ЭСЭ от подансамбля 1, т.к. сигнал от подансамбля 2 равен нулю. Полученный результат показывает, что в этом случае, благодаря отсутствию вклада от триад с триплетным состоянием пар AB, полностью удаётся воспроизвести фазу спинов A.

Заключение

Численное моделирование показывает, что модифицированные реакционные центры фотосинтеза могут служить в качестве модельной системы для проведения эксперимента по квантовой телепортации электронных спинов. В общем случае сигнал ЭСЭ содержит вклады от двух подансамблей, причём телепортированное состояние наблюдается только от подансамбля 1. Вклады в ЭСЭ при малых временах задержки τ от подансамблей 1 и 2 компенсируют друг друга, что может усложнить детектирование телепортированного состояния. Спинная эволюция системы может существенно изменить наблюдаемый сигнал. В модифицированной схеме квантовой телепортации имеется дополнительный механизм

рекомбинации подсистемы 2, который позволяет уводить триады с триплетными парами АВ, не влияя на форму сигнала эха, наблюдаемого на спинах С.

Литература

1. Bennett C.H., Brassard G., Crépeau C., Jozsa R., Peres A., Wootters W.K.: Phys. Rev. Lett. **70**, 1895–1899 (1993)
2. Einstein A., Podolski B., Rosen N.: Phys. Rev. **47**, 777–780 (1935)
3. Bouwmeester D., Pan J.-W., Mattle K., Eibl M., Weinfurter H., Zeilinger A.: Nature **390**, 575–579 (1997)
4. Marcikic I., de Riedmatten H., Tittel W., Zbinden H., Gisin N.: Nature **421**, 509–513 (2003)
5. Pan J.-W., Gasparoni S., Aspelmeyer M., Jennewein T., Zeilinger A.: Nature **421**, 721–724 (2003)
6. Shih Y.H.: Ann. Phys. **10**, 19–34 (2001)
7. Van Houwelingen J.A.W., Beveratos A., Brunner N., Gisin N., Zbinden H.: Phys. Rev. A **74**, 022303 (2006)
8. Nielsen M.A., Knill E., Laflamme R.: Nature **396**, 52–55 (1998)
9. Riebe M., Haffner H., Roos C.F., Hansel W., Benhelm J., Lancaster G.P.T., Korber T.W., Becher C., Schmidt-Kaler F., James D.F.V., Blatt R.: Nature **429**, 734–737 (2004)
10. Barrett M.D., Chiaverini J., Schaetz T., Britton J., Itano W.M., Jost J.D., Knill E., Langer C., Leibfried D., Ozeri R., Wineland D.J.: Nature **429**, 737–739 (2004)
11. Salikhov K.M., Golbeck J.H., Stehlik D.: Appl. Magn. Reson. **31**, 237–252 (2007)
12. Kandrashkin Yu.E., Salikhov K.M.: Appl. Magn. Reson. **37**, 549–566 (2010)

Новый алгоритм определения абсолютных значений параметров спин-гамильтониана триплетного состояния с симметричным g -тензором

А. Е. Мамбетов

Отдел химической физики, лаборатория квантовой динамики и информатики

В данной работе установлены аналитические соотношения между резонансными значениями напряжённости постоянного магнитного поля, соответствующими линиям одноквантовых переходов спектра ЭПР триплетного состояния. На их основе построен алгоритм для прямого экспериментального определения абсолютных величин всех параметров спин-гамильтониана триплета с симметричным g -тензором.

Введение

Триплетное состояние (состояние, описываемое истинным либо эффективным спином $S = 1$) играет важную роль в фотохимии. В частности, значительное число фотохимических реакций начинается с поглощения кванта света молекулой и перехода последней в метастабильное триплетное возбуждённое состояние, наблюдаемое методом ЭПР. Отсюда естественным образом возникает задача об экспериментальном определении методом ЭПР параметров спин-гамильтониана триплетного состояния. В данной работе предлагается алгоритм частичного решения этой задачи для монокристаллов. Предполагается, что этот алгоритм будет особенно полезным в ситуации, когда главные оси тензоров $\mathbf{D}$ и $\mathbf{g}$ не совпадают.

В отличие от известных автору из литературы других алгоритмов решения этой же задачи, предлагаемый алгоритм не требует численной подгонки, позволяя получать параметры напрямую из экспериментальных данных.

Некоторые свойства спин-гамильтониана триплета

Спин-гамильтониан, описывающий расщепление уровней триплетного состояния во внешнем магнитном поле $\mathbf{H}$ в главных осях X, Y, Z тензора расщепления в нулевом поле $\mathbf{D}$, записывается в виде [1, 2]:

$$\mathcal{H}_T = \beta \mathbf{H} \mathbf{g} \mathbf{S} + D(\mathbf{S}_Z^2 - \mathbf{S}^2/3) + E(\mathbf{S}_X^2 - \mathbf{S}_Y^2). \quad (1)$$

Введём вектор $\mathbf{B} = \beta \mathbf{g}^T \mathbf{H}$. Пусть вектор $\mathbf{B}$ имеет в главных осях D -тензора сферические координаты: $B \geq 0$, $\theta \in [0, \pi]$ и $\varphi \in [0, 2\pi]$. За полярную ось Z примем главную ось D -тензора, соответствующую его максимальному, по модулю главному, значению. При этом будет выполняться неравенство $|D| \geq 3|E|$.

Запишем уравнение на уровни энергии в этих координатах:

$$\epsilon^3 - (D^2/3 + E^2 + B^2)\epsilon - B^2 K(\theta, \varphi) + 2D(D^2 - 9E^2)/27 = 0, \quad (2)$$

где $K(\theta, \varphi) = D[\cos^2(\theta) - 1/3] + E \sin^2(\theta) \cos(2\varphi)$. Применив формулы Виета [3] к (2), получаем:

$$\sigma_1^{def} = \epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 = 0, \quad (3a)$$

$$\sigma_2^{def} = \epsilon_1 \epsilon_2 + \epsilon_2 \epsilon_3 + \epsilon_1 \epsilon_3 = -(D^2/3 + E^2 + B^2), \quad (3б)$$

$$\sigma_3^{def} = \epsilon_1 \epsilon_2 \epsilon_3 = B^2 K(\theta, \varphi) - 2D(D^2 - 9E^2)/27. \quad (3в)$$

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – так называемые основные симметрические полиномы от корней (2) [3]. Через σ_1, σ_2 и σ_3 можно выразить и далее с помощью (3) вычислить любые другие симметрические полиномы от ϵ_1, ϵ_2 и ϵ_3 , не решая (2) [3].

Связи между положениями линий спектра ЭПР триплета

Запишем выражение, выполняющееся во всех возможных ситуациях одноквантовых переходов между уровнями триплетного состояния, происходящих под действием СВЧ-поля частотой ω_0 рад/с:

$$[(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 - (\hbar\omega_0)^2] \times [(\epsilon_2 - \epsilon_3)^2 - (\hbar\omega_0)^2] \times [(\epsilon_3 - \epsilon_1)^2 - (\hbar\omega_0)^2] = 0. \quad (4)$$

Равенство (4) справедливо тогда и только тогда, когда разность между любыми двумя корнями (2) равна энергии кванта СВЧ $\hbar\omega_0$. При этом (4) – симметрический полином от ϵ_1, ϵ_2 и ϵ_3 , что позволяет выразить его через σ_1, σ_2 и σ_3 и преобразовать с помощью (3) в:

$$4(D^2/3 + E^2 + B^2)^3 - 27[B^2 K(\theta, \varphi) - 2D(D^2 - 9E^2)/27]^2$$

$$-9(\hbar\omega_0)^2(D^2/3 + E^2 + B^2)^2 + 6(\hbar\omega_0)^4(D^2/3 + E^2 + B^2) - (\hbar\omega_0)^6 = 0. \quad (5)$$

При фиксированных значениях D , E , ω_0 , θ и φ (5) – кубическое уравнение на значения $\mathbf{B}^2$, соответствующие резонансным одноквантовым переходам. Раскрыв в (5) скобки, упростив и приведя подобные, получаем приведённое уравнение на $X = \mathbf{B}^2$:

$$\begin{aligned} X^3 - \{9[(\hbar\omega_0)^2 + 3K^2(\theta, \varphi)]/4 - D^2 - 3E^2\}X^2 \\ + \{3[(\hbar\omega_0)^2 - D^2/3 - E^2] \times [(\hbar\omega_0)^2/2 - D^2/3 - E^2] \\ + DK(\theta, \varphi)(D^2 - 9E^2)\}X \\ - [(\hbar\omega_0)^2/4 - E^2] \times [(\hbar\omega_0)^2 - (D - E)^2] \\ \times [(\hbar\omega_0)^2 - (D + E)^2] = 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Применив к (6) формулы Виета, получаем ключевые для предлагаемого алгоритма соотношения между X_i :

$$X_1 + X_2 + X_3 = 9[(\hbar\omega_0)^2 + 3K^2(\theta, \varphi)]/4 - D^2 - 3E^2, \quad (7a)$$

$$\begin{aligned} X_1 X_2 X_3 = [(\hbar\omega_0)^2/4 - E^2] \times [(\hbar\omega_0)^2 - (D - E)^2] \\ \times [(\hbar\omega_0)^2 - (D + E)^2]. \end{aligned} \quad (7b)$$

Лишь значения $X \geq 0$ связаны с реальными положениями линий в спектре ЭПР триплета.

Можно решить (6) аналитически и разобрать все ситуации, когда и какие переходы наблюдаемы, а какие нет, и указать почему. Но мы этого делать не будем, т.к. нас будут интересовать лишь те случаи, когда все корни (6) положительны при любых ориентациях кристалла относительно внешнего поля: для работы алгоритма необходимо, чтобы все три одноквантовые линии всегда были наблюдаемы в эксперименте. Вдобавок, чтобы важнейшее для алгоритма выражение (7б) не стало тождественно равным нулю, необходимо, чтобы все корни (6) были ненулевыми. Эти необходимые для работы алгоритма условия приводят к требованию отсутствия запрета на все переходы и, согласно уточнённой теореме Декарта [3], к следующему ограничению на энергию кванта СВЧ: $\hbar\omega_0 > |D| + |E|$.

Поиск главных осей и относительных модулей главных значений симметричного g -тензора триплета

Отметим, что правая часть (7б) не зависит от θ и φ и является константой для заданного типа триплета и при фиксированной частоте СВЧ. Это позволяет найти направления главных осей и относительные модули главных значений симметричного (т.е. $g_{\alpha\beta} = g_{\beta\alpha}$) тензора $\mathbf{g}$.

В эксперименте мы напрямую контролируем вектор напряжённости внешнего поля $\mathbf{H}$. Поскольку мы рассматриваем лишь те случаи, когда все три линии наблюдаемы при любой заданной ориентации кристалла относительно

$\mathbf{H}$, у нас всегда есть три резонансных значения поля: H_1 , H_2 и H_3 . Их связь с соответствующими X_1 , X_2 и X_3 из (7) выражается:

$$X_i \stackrel{\text{def}}{=} \mathbf{B}_i^2 = \beta^2 \mathbf{H}_i \mathbf{g} \mathbf{g}^T \mathbf{H}_i, \quad i = \{1, 2, 3\}. \quad (8)$$

Так как $\mathbf{g} \mathbf{g}^T$ – симметричный тензор по построению, его собственный базис $\{u, v, w\}$ ортогонален [4]. Главные значения $\mathbf{g} \mathbf{g}^T - g_u^2, g_v^2$ и g_w^2 неотрицательны.

Пусть вектор $\mathbf{H}$ в собственном базисе $\mathbf{g} \mathbf{g}^T$ имеет сферические координаты $H \geq 0, \mu \in [0, \pi]$ и $\eta \in [0, 2\pi]$. Тогда декартовы координаты $\mathbf{H}$ в том же базисе равны: $H \sin(\mu) \cos(\eta)$, $H \sin(\mu) \sin(\eta)$ и $H \cos(\mu)$. Подставив их в (8), а (8) в (7б), получим:

$$H_1 H_2 H_3 g_{\text{eff}}^3(\mu, \eta) = C = \text{const} > 0, \quad (9)$$

$$\begin{aligned} g_{\text{eff}}(\mu, \eta) \\ = \sqrt{[g_u^2 \cos^2(\eta) + g_v^2 \sin^2(\eta)] \sin^2(\mu) + g_w^2 \cos^2(\mu)}. \end{aligned}$$

Таким образом, если $\mathbf{g} \mathbf{g}^T$ анизотропный, то при произвольных вращениях кристалла во внешнем магнитном поле произведение непосредственно измеряемых H_1 , H_2 и H_3 будет меняться, но только так, чтобы левая часть (9) оставалась постоянной. $g_{\text{eff}}(\mu, \eta)$ может стать равным нулю, только если хотя бы одно из $\{g_u, g_v, g_w\}$ равно нулю. Но это означает существование ориентаций, в которых линии сдвигаются по полю в бесконечность, т.е. становятся ненаблюдаемыми. Поскольку мы условились не рассматривать подобные ситуации, у нас $g_{\text{eff}} > 0$ всегда. Подставив $g_{\text{eff}}(\mu, \eta) > 0$ в (9), получаем:

$$H_1 H_2 H_3(\mu, \eta) = C g_{\text{eff}}^{-3}(\mu, \eta). \quad (10)$$

Так как $C > 0, H_1 H_2 H_3 > 0$ и $g_{\text{eff}} > 0$, то из (10) очевидно, что точка максимума $H_1 H_2 H_3$ [5] является точкой минимума g_{eff} , точка минимума $H_1 H_2 H_3$ – это точка максимума g_{eff} , а седловая точка $H_1 H_2 H_3$ – седловая точка g_{eff} . Стационарным точкам [5] функции двух переменных $g_{\text{eff}}(\mu, \eta)$ соответствуют направления $\mathbf{H}$ вдоль главных осей $\mathbf{g} \mathbf{g}^T$.

Линейный оператор или сохраняет направление вектора, параллельного одной из главных осей, или инвертирует его, если соответствующее собственное значение отрицательно. Поэтому в стационарных точках g_{eff} векторы $\mathbf{H}$ и соответствующий ему $\mathbf{B}$ коллинеарны.

Если $\mathbf{g}$ симметричен, то $\mathbf{g} \mathbf{g}^T = \mathbf{g}^2$, а собственные оси $\mathbf{g}$ и $\mathbf{g} \mathbf{g}^T$ совпадают. Таким образом, главные оси симметричного $\mathbf{g}$ находятся поиском стационарных точек $H_1 H_2 H_3(\mu, \eta)$ путём вращения кристалла в поле $\mathbf{H}$ и измерения H_1 , H_2 и H_3 при различных ориентациях в пределах полусферы. Найдя стационарные точки, мы тем самым находим направления главных осей симметричного g -тензора, и можем переходить в его систему координат, т.к. теперь можем отсчитывать μ и η .

С помощью (10) также можно найти относительные модули главных значений $\mathbf{g} \mathbf{g}^T$.

Выберем любое из g_u^2 , g_v^2 и g_w^2 , например g_u^2 . Обозначив $g_v^2 = a^2 g_u^2$, $g_w^2 = b^2 g_u^2$ ($a, b \in \mathbb{R}$) и подставив их в (10), получаем:

$$H_1 H_2 H_3(\mu, \eta) = C g_u^{-3} \{ [\cos^2(\eta) + a^2 \sin^2(\eta)] \sin^2(\mu) + b^2 \cos^2(\mu) \}^{-3/2}. \quad (11)$$

Формула (11) для ориентаций **H** вдоль главных осей $\mathbf{gg}^T$ приобретает вид:

$$H_1 H_2 H_3(\mu, \eta) = C |g_\alpha|^{-3}, \quad \alpha = \{u, v, w\}. \quad (12)$$

Измерив $H_1 H_2 H_3$ в этих ориентациях, находим a и b :

$$a = \sqrt[3]{\frac{H_1 H_2 H_3(\pi/2, 0)}{H_1 H_2 H_3(\pi/2, \pi/2)}}, \quad b = \sqrt[3]{\frac{H_1 H_2 H_3(\pi/2, 0)}{H_1 H_2 H_3(0, \forall)}}. \quad (13)$$

1, a и b – относительные (в единицах $|g_u|$) модули главных значений симметричного **g**.

Теперь для любого **H** можно найти относительный квадрат соответствующего ему **B**:

$$\mathbf{B}^2 / g_u^2 = \beta^2 (H_u^2 + a^2 H_v^2 + b^2 H_w^2), \quad (14)$$

где H_u , H_v и H_w – проекции вектора **H** на главные оси $\mathbf{gg}^T$. Способ нахождения величины g_u^2 мы укажем позже.

Нахождение главных осей **D**-тензора и относительных величин **D** и **E**

В этой работе мы находим лишь абсолютное значение D . Знак E – условность, определяемая выбором обозначений главных осей X и Y тензора **D**. Выберем главные оси X и Y тензора **D** так, чтобы знаки D и E совпадали. Подставив (8) в (7a), получаем:

$$\begin{aligned} & (H_1^2 + H_2^2 + H_3^2) \\ & \times \{ [\cos^2(\eta) + a^2 \sin^2(\eta)] \sin^2(\mu) + b^2 \cos^2(\mu) \} \\ & = \frac{9[h^2 + 3K^2(\theta, \phi)]}{4\beta^2 g_u^2} - \frac{D^2 + 3E^2}{\beta^2 g_u^2}. \end{aligned} \quad (15)$$

Левая часть (15) нам известна из результатов предыдущего параграфа, а о правой части мы знаем, насколько в единицах g_u^2 отличаются её максимумы от минимума при вращениях кристалла. Минимум K^2 равен 0, а глобальный максимум равен $4D^2/9$. Этот максимум строгий и достигается, когда **B** лежит на оси Z тензора **D**. Когда **B** лежит на оси Y , достигается другой, локальный (если $E \neq D/3$) строгий (если $E \neq 0$) максимум K^2 , равный $(D/3 + E)^2$. Когда **B** лежит на оси X , достигается седловая (если $E \neq 0$ и $E \neq D/3$) точка K^2 со значением $(D/3 - E)^2$. Если $E = 0$, то локальный максимум $K^2 = D^2/9$ нестрогий и достигается при любой ориентации **B** в плоскости XY , седловых точек при этом нет. Если же $E = D/3$, то мак-

симумы K^2 вдоль осей Z и Y строгие, оба равны $4D^2/9$, а вдоль X – нестрогий минимум, седловых точек также нет. Минимум K^2 хоть и глобальный, но нестрогий и достигается обычно при ориентациях **B**, не совпадающих с главными осями D -тензора.

Геометрическое место точек минимума K^2 описывается формулой: $3\sin^2(\theta) = 2D/[D - E\cos(2\phi)]$. Это две замкнутые кривые на сфере, переходящие одна в другую при операциях инверсии и отражении в канонической плоскости XY тензора **D**, и переходящие сами в себя при отражении в плоскостях XZ и YZ . Разница между глобальным максимумом и минимумом правой части (15) равна $3D^2/(\beta^2 g_u^2)$. Найдя их из расчётов левой части (15) на основе результатов предыдущих измерений (и при необходимости проводя дополнительные измерения для повышения точности определения положений экстремумов), получим $|D|/|g_u|$. Таким же способом найдя второй, т.е. локальный максимум левой части (15) и вычтя из него минимум, получим $3(D^2 + 3E^2)/(\beta^2 g_u^2) = 4C_2$, где C_2 численный результат вычитания. Отсюда имеем: $|E|/|g_u| = 2\beta(C_2/27)^{1/2} - |D|/3|g_u|$.

В общем случае при произвольных знаках у главных значений **g** и несовпадении главных осей **g** и **D** каждому **H** могут соответствовать до восьми различных **B**, переходящих друг в друга при отражении в канонических плоскостях **g**. Им соответствуют четыре различные взаимные ориентации **D** и **g** (**D** инвариантен относительно инверсии). Значит, описанным способом ориентацию **D** относительно **g** можно найти лишь с точностью до отражений в канонических плоскостях **g**. Иными словами, мы узнаем лишь модули эйлеровых углов, определяющих взаимную ориентацию собственных базисов **D** и **g**. Если главные значения **g** одного знака или главные оси **D** и **g** совпадают, то неоднозначность исчезает.

Нахождение g_u^2

Для триплета возможны две качественно различные ситуации, в которых две линии в спектре могут сливаться: когда два уровня (1) пересекаются и когда уровни эквидистантны. Вторая ситуация легко реализуема на непрерывном множестве ориентаций **B** относительно **D**, чем выгодно и практически легко отличается от первой. Добившись реализации второй ситуации путём поворота кристалла, мы легко находим g_u^2 .

Из (3a) и (3в) следует условие реализации: $\mathbf{B}^2 = (2D/27)(D^2 - 9E^2)/K^2, \Rightarrow \mathbf{B}^2 \in [D^2/9 - E^2, +\infty)$.

При этом (2) приобретает вид: $\varepsilon^2 = D^2/3 + E^2 + \mathbf{B}^2$. Из условия резонанса имеем: $(\hbar\omega_0)^2 = \varepsilon^2$.

Поделив $(\hbar\omega_0)^2 = \varepsilon^2$ на g_u^2 , получим: $(\hbar\omega_0)^2/g_u^2 = (D^2/3 + E^2)/g_u^2 + \beta^2(H_u^2 + a^2 H_v^2 + b^2 H_w^2)$.

Справа нам известны все величины, слева – $(\hbar\omega_0)^2$. Поделив величину $(\hbar\omega_0)^2$ на результат выражения справа, находим величину g_u^2 и с её помощью вычисляем g_v^2 , g_w^2 , $|D|$ и $|E|$.

Ограничения алгоритма

1. Тензор $\mathbf{g}$ должен быть симметричным, т.е. $g_{\alpha\beta} = g_{\beta\alpha}$.
2. Все три линии одноквантовых переходов должны быть разрешены при любых ориентациях кристалла относительно $\mathbf{H}$, за исключением конечного числа достаточно изолированных точек. (Например, при совпадении оси Z D -тензора с одной из осей g -тензора при Z -ориентации $\mathbf{H}$, переход в половинном поле запрещён, что позволяет найти Z -ориентацию.) То есть, линия перестаёт быть наблюдаемой в достаточно малой окрестности точки, в которой переход строго запрещён, чтобы можно было определить её теоретическое положение в спектре.
3. Энергия кванта СВЧ $\hbar\omega_0$ должна удовлетворять неравенству: $(\hbar\omega_0)^2 > |D| + |E|$.

4. Главные значения g -тензора не должны быть слишком малы, чтобы резонансные значения $\mathbf{H}$ всех трёх линий всегда были в пределах возможностей аппаратуры.

Литература

1. Абрагам А., Блيني Б.: Электронный парамагнитный резонанс переходных ионов. Т. 1. М.: Мир 1972. 652 с.
2. Керрингтон А., Мак-Лечлан Э.: Магнитный резонанс и его применение в химии. М.: Мир 1970. 448 с.
3. Курош А.Г.: Курс высшей алгебры. М.: Наука 1968. 431 с.
4. Шилов Г.Е.: Конечномерные линейные пространства. М.: Наука 1969. 432 с.
5. Кудрявцев Л.Д.: Курс математического анализа. Т. 2. М.: Дрофа 2004. 720 с.

Изучение концентрационных зависимостей параметров сплавов $\text{Ni}_{1-x}\text{Fe}_x$ в рамках приближения когерентного потенциала метода Корринги-Кона-Ростокера

В. В. Клековкина, Р. М. Аминова

Отдел химической физики, лаборатория квантовой динамики и информатики

В работе представлены результаты расчётов концентрационных зависимостей некоторых параметров неупорядоченных магнитных сплавов $\text{Ni}_{1-x}\text{Fe}_x$, для концентрации x , меняющейся в широком диапазоне 0–0.7, проведённых в рамках приближения когерентного потенциала метода Корринги-Кона-Ростокера.

Введение

Соединение $\text{Ni}_{1-x}\text{Fe}_x$ является неупорядоченным магнитным металлическим сплавом с кубической гранецентрированной кристаллической решёткой. Этот сплав широко изучался ранее многими авторами в рамках локального приближения метода функционала плотности (см., например, [1, 2]). В данной работе нами были проведены расчёты концентрационных зависимостей параметров сплавов $\text{Ni}_{1-x}\text{Fe}_x$ в рамках более точного градиентного приближения, в котором функционал обменно-корреляционной энергии зависит не только от электронной плотности, но и от градиента плотности.

Расчёты выполнены нами в рамках приближения когерентного потенциала метода Корринги-Кона-Ростокера. В этом методе рассчитывается электронная функция Грина $G(\mathbf{r}, \mathbf{r}'; E)$, зная которую, можно найти среднее значение любой физической величины:

$$A = -\frac{1}{\pi} \text{Im Sp} \int^{E_F} dE \hat{A} G(\mathbf{r}, \mathbf{r}'; E).$$

Расчёты выполнены нами с использованием программы AkaiKKR. Вычисление энергии проводилось в рамках теории функционала спиновой плотности в полурелятивистском приближении с учётом спин-орбитального взаимодействия.

Данная работа проведена с целью выявления точности расчётов в рамках описанного выше теоретического подхода значений магнитных моментов и сверхтонких полей на основе сравнения полученных результатов с экспериментальными данными.

Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлена зависимость равновесного значения постоянной решётки $\text{Ni}_{1-x}\text{Fe}_x$ от концентрации Fe. Видно, что равновесное значение постоянной решётки возрастает с увеличением концентрации Fe. При увеличении концентрации Fe также наблюдается возрастание полного

магнитного момента (рис. 2). На атом Fe приходится больший объём, чем на атом Ni, поскольку локальный магнитный момент на атоме Fe больше (рис. 2), и, следовательно, замещение атомов Ni атомами Fe должно сопровождаться объёмным расширением [3]. Сравнивая полученные результаты с экспериментальными данными, можно сказать, что применённый подход довольно хорошо описывает концентрационную зависимость для постоянной решётки и магнитных моментов.

Сверхтонкие поля на ядрах Ni и Fe показаны на рис. 3. Сверхтонкие поля и на ядрах Ni, и на ядрах Fe возрастают по абсолютной величине с увеличением концентрации Fe. Это обусловлено, как отмечалось в [4], возрастанием намагниченности за счёт отрицательной электронной поляризации в местах расположения ядер, обусловленной хвостами d-волновых функций, центрированных на соседних атомах. Для переходных элементов другой важный вклад в сверхтонкое поле возникает из локального обменного перекрытия, которое, грубо говоря, пропорционально локальному магнитному моменту. В данном случае, однако, этот эффект не является самым важным для общей тенденции, поскольку локальный

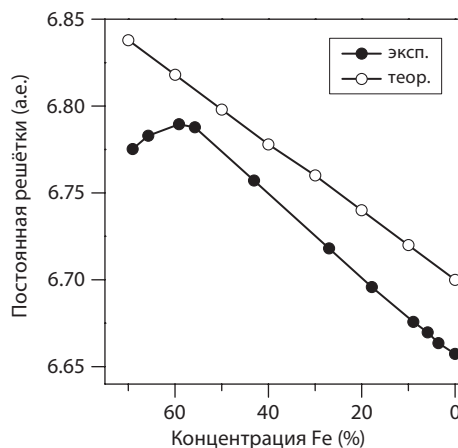


Рис. 1. Концентрационная зависимость равновесного параметра решётки.

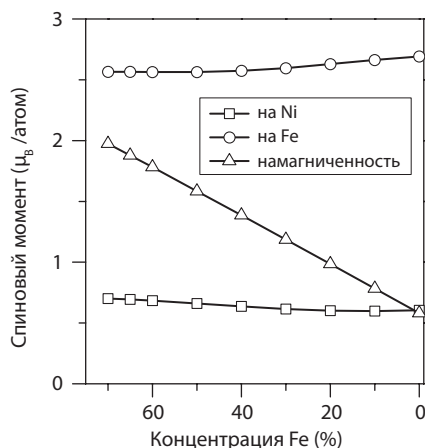


Рис. 2. Концентрационная зависимость локального магнитного момента на атомах Ni и Fe и намагниченности.

магнитный момент слабо зависит от концентрации Fe, особенно для атомов Ni, в то время как намагниченность при изменении x от 0 до 0.7 возрастает более чем в два раза. Для Fe уменьшение локального магнитного момента с увеличением концентрации Fe приводит к меньшему локальному вкладу в сверхтонкое поле. Согласие представленных результатов с экспериментальными данными довольно хорошее. Некоторое отличие наблюдается в критической области, где ферромагнитное состояние становится нестабильным ($x > 0.6$), что связано с некорректностью примененного подхода в этой области.

Заключение

Таким образом, нам удалось на основании компьютерного моделирования рассчитать значения таких параметров неупорядоченных сплавов $Ni_{1-x}Fe_x$ как равновесный параметр решётки, намагниченность, локальные магнитные моменты на атомах и сверхтонкие поля на ядрах. На основании этих расчётов предсказано объёмное расширение с увеличением концентрации Fe и увеличение сверхтонких полей, что соответствует экспериментально

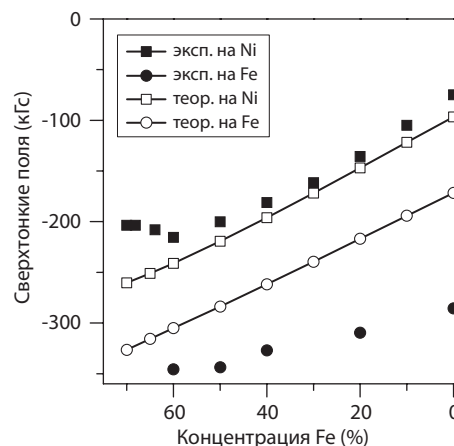


Рис. 3. Концентрационная зависимость сверхтонких полей на ядрах Ni и Fe.

наблюдаемому поведению, дано обоснование этих явлений. Полученные теоретически численные значения находятся в хорошем количественном согласии с экспериментальными данными.

Благодарим за помощь с.н.с. отдела информационных технологий Казанского филиала Межведомственного суперкомпьютерного центра РАН, к.х.н. Д. В. Чачкова, который взял на себя труд, связанный с компиляцией программы.

Авторы выражают признательность проф. К. М. Салихову (КФТИ КазНЦ РАН) за полезное обсуждение результатов данной работы и проф. М. Г. Шеляпиной (СПбГУ) за оказанное содействие в освоении методики проведения расчётов.

Литература

1. Bansil A.: Phys. Rev. Lett. **41**, 1680–1673 (1978)
2. Stocks G.M., Temmerman W.M., Gyorffy B.L.: Phys. Rev. Lett. **41**, 339–343 (1978)
3. Akai H.: J. Phys.: Condens. Matter **1**, 8045–8063 (1989)
4. Blugel S., Akai H., Zeller R.: Phys. Rev. B **35**, 3271–3283 (1987)

Обменные взаимодействия и спиновая динамика в системах, построенных из кластеров

В. К. Воронкова, Р. Т. Галеев, Л. В. Мингалиева, А. А. Суханов, И. Т. Хайрулдинов

Отдел химической физики, лаборатория спиновой физики и спиновой химии и лаборатория квантовой динамики и информатики

Методом ЭПР исследованы спин-спиновые взаимодействия в соединениях $\{[\text{Nd}_2(\alpha\text{-C}_4\text{H}_7\text{O}_2\text{COO})_6(\text{H}_2\text{O})_2]\}_n$ (I) и $[\text{LCu}_2\text{Gd}_3(\text{acda})_{1,5}(\text{H}_2\text{O})_2] \cdot 13\text{H}_2\text{O}$ (II), построенных из двухъядерных кластеров $\text{Nd}^{3+}\text{-Nd}^{3+}$ и Cu-Gd , соответственно. Форма спектров и их температурная зависимость детально проанализированы на основе численных расчётов спектров ЭПР поликристаллических образцов изолированных двухъядерных кластеров, взаимодействующих кластеров и с учётом релаксационных процессов. Для соединения I из согласования экспериментальных и рассчитанных спектров ЭПР в X- и Q-диапазонах определены анизотропные параметры спин-спинового взаимодействия между ионами неодима в двухъядерном кластере $\text{Nd}^{3+}\text{-Nd}^{3+}$, вычислены и проанализированы анизотропные параметры обменного взаимодействия. Представлен анализ особенностей температурной зависимости спектра ЭПР соединения I в X-диапазоне с учётом обменного взаимодействия между кластерами $\text{Nd}^{3+}\text{-Nd}^{3+}$ и релаксационных процессов. Установлено, что между ионами меди и гадолиния в II реализуется ферромагнитное обменное взаимодействие и, вероятно, слабое антиферромагнитное взаимодействие между двухъядерными фрагментами медь-гадолиний.

Введение

Молекулярные системы с редкоземельными ионами представляются перспективными для создания новых магнитных молекулярных материалов, необходимых, например, для хранения информации, для квантовых компьютеров. Для создания новых материалов с заданными магнитными свойствами необходимы знания о природе анизотропии обменных взаимодействий и связи их с анизотропией локальных свойств ионов. Особый интерес представляют молекулярные системы, построенные из кластеров, в которых обменное взаимодействие реализуется между ограниченным числом парамагнитных ионов. Эти системы являются прекрасными модельными системами для изучения анизотропии обменного взаимодействия, а в последние годы многоядерные кластеры стали объектами пристального внимания в связи с созданием мономолекулярных магнитов – многоядерных кластеров, для которых характерна такая медленная релаксация при низких температурах, что они ведут себя как магниты. Для реального использования этих систем, необходимо повысить температуру T_K , при которой эта особенность проявляется. Установлено, что важным фактором, влияющим на повышение T_K , является анизотропия локальных свойств взаимодействующих ионов и анизотропия спин-спинового взаимодействия между ними. Мы имеем достаточно большой опыт исследования анизотропии обменных взаимодействий в кластерах методом ЭПР. В последние годы мы исследовали методом ЭПР кластеры, построенные из ионов двухвалентной меди и редкоземельных ионов [1–4]. Эти исследования не только дали первые примеры изучения методом ЭПР взаимодействия между ионами меди и редкоземельными ионами, но и указали на важную роль релаксационных процессов на свойства таких смешанных кластеров. В 2009 году влияние

релаксационных процессов на перенос намагниченности и вопросы, связанные с формированием анизотропии обменных взаимодействий, мы рассмотрели на примере соединения, построенного из двухъядерных кластеров ионов неодима.

Хотя для ионов Nd^{3+} характерна существенная анизотропия локальных свойств, на данный момент известно только несколько экспериментальных работ, посвящённых исследованию методом ЭПР обменных взаимодействий между этими ионами [5–12]. Причём, все исследования выполнены на диамагнитных кристаллах, допированных ионами Nd^{3+} , анализ анизотропии обменных взаимодействий которых практически отсутствует. Примеры исследования методом ЭПР кластеров, построенных из ионов неодима нам не известны, поэтому результаты изучения нового соединения, построенного из двухъядерных кластеров, представляют особый интерес. Параллельно с изучением анизотропии обменного взаимодействия, мы рассмотрели особенности спектров ЭПР поликристаллического образца этого соединения, связанные с взаимодействием между кластерами. Правильная интерпретация особенностей спектров ЭПР позволяет получить информацию о взаимодействиях между кластерами, которые ответственны за возникновения дальнего порядка в соединениях, построенных из кластеров. Рассмотрение особенностей спектров ЭПР, связанных с взаимодействием между кластерами, мы продолжили при исследовании соединения, цепочки которого образованы двухъядерными кластерами Cu-Gd .

ЭПР соединения $\{[\text{Nd}_2(\alpha\text{-C}_4\text{H}_7\text{O}_2\text{COO})_6(\text{H}_2\text{O})_2]\}_n$

Исследование выполнено на поликристаллических образцах соединения $\{[\text{Nd}_2(\alpha\text{-C}_4\text{H}_7\text{O}_2\text{COO})_6(\text{H}_2\text{O})_2]\}_n$ (I).

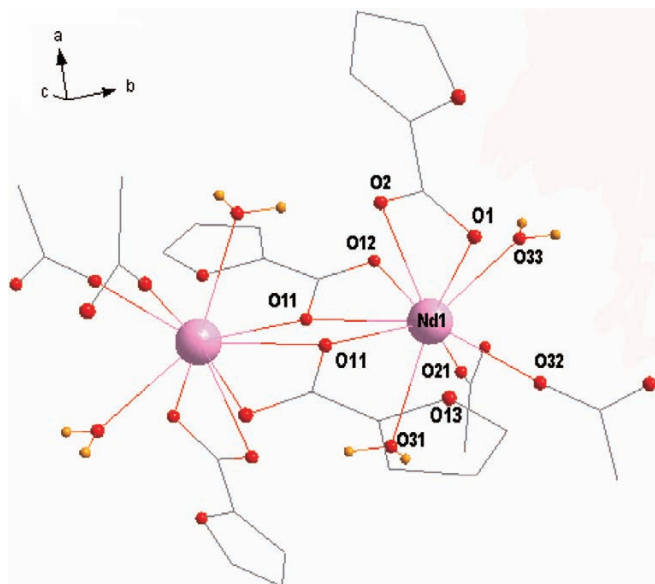


Рис. 1. Структура двухъядерного кластера $\text{Nd}^{3+}\text{-Nd}^{3+}$ в I.

Ионы неодима в двухъядерных кластерах, из которых построено данное соединение (рис. 1), связаны двумя мостиковыми фрагментами и находятся на расстоянии 0.445 нм. Кластеры в данном соединении связаны друг с другом, и расстояние между ближайшими ионами неодима соседних кластеров равно 0.61 нм.

Спектры ЭПР соединения I наблюдаются при $T < 40$ К (рис. 2). Известно, что основной терм иона Nd^{3+} в поле лигандов низкой симметрии расщепляется на пять кramerсов дублетов. Для этого иона характерны короткие времена парамагнитной релаксации, и спектр ЭПР иона Nd^{3+} наблюдается при низких температурах, когда скорость релаксации уменьшается. Спектр ЭПР обусловлен переходами между подуровнями нижнего дублета и описывается эффективным спином $S' = 1/2$ [13]. Спектры соединения I, наблюдаемые при $T = 4.2$ К

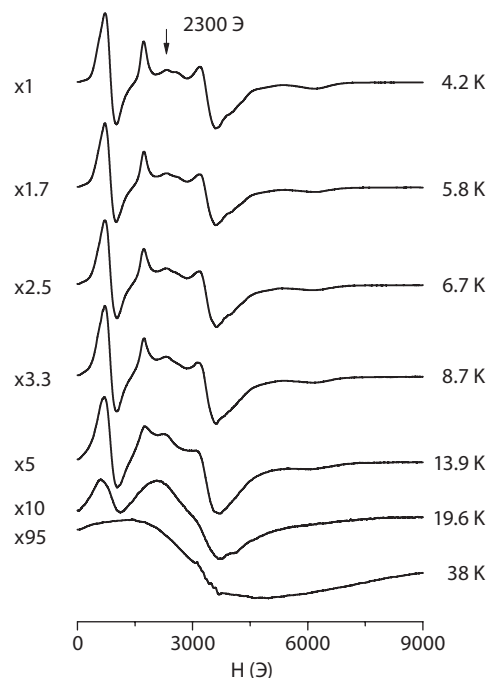


Рис. 2. Температурная зависимость спектра ЭПР соединения I в X-диапазоне. Слева показано относительное усиление сигнала.

в X- и Q-диапазонах (рис. 3), соответствуют спектрам двухъядерного кластера с $S_1 = S_2 = 1/2$. Спектры поликристаллических образцов двухъядерных кластеров с $S_1 = S_2 = 1/2$ хорошо изучены [14], и их интерпретация обычно не вызывает сложностей. В данном примере из-за большой анизотропии эффективного g -тензора интерпретировать спектры поликристаллического образца соединения I удалось только на основании численных расчётов спектров.

Расчёты спектров ЭПР выполнены с использованием спин-гамильтониана, описывающего взаимодействия в

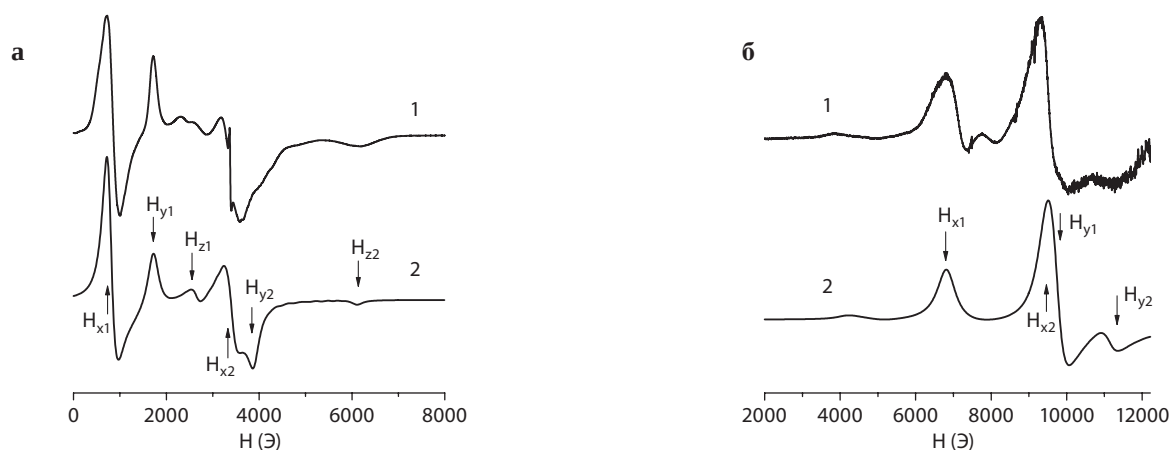


Рис. 3. Экспериментальный спектр ЭПР поликристаллического образца соединения I при 4.2 К (1) и теоретический спектр ЭПР двухъядерного кластера $\text{Nd}^{3+}\text{-Nd}^{3+}$: $S_1 = S_2 = 1/2$, $g_x = 3.2$, $g_y = 2.5$, $g_z = 1.45$, $r_{12} = 0.445$ нм, $\theta = 90^\circ$, $\varphi = 0^\circ$, $J_x = -0.182$ см $^{-1}$, $J_y = 0.065$ см $^{-1}$, $J_z = 0.117$ см $^{-1}$ (2). а X-диапазон, б Q-диапазон.

двухъядерном кластере $\text{Nd}^{3+}\text{-Nd}^{3+}$ в представлении эффективных спинов:

$$\mathcal{H} = \beta(\mathbf{S}'_1 + \mathbf{S}'_2)\{g\}\mathbf{H} + J_{12}\mathbf{S}'_1\mathbf{S}'_2 + \mathbf{S}'_1\{D\}\mathbf{S}'_2, \quad (1)$$

где $\mathbf{S}'_1, \mathbf{S}'_2 = 1/2$ – эффективные спины ионов Nd^{3+} , $\{g\}$ – эффективный g -тензор, J_{12} – изотропная часть обменного взаимодействия, которая приводит к образованию триплетного состояния с $S = 1$ и синглетного состояния с $S = 0$; $\{D\}$ – тензор, который описывает расщепление триплетного состояния в нулевом магнитном поле: $\{D\} = \{J\} + \{D_{\text{d-d}}\}$, $\{J\}$ и $\{D_{\text{d-d}}\}$ – тензоры анизотропного обменного и дипольного взаимодействий.

Из согласования рассчитанных и экспериментальных спектров на двух частотах (рис. 3) мы определили анизотропию $\{g\}$ -тензора: $g_x = 3.2$, $g_y = 2.5$, $g_z = 1.45$ и $\{D\}$ -тензора. Диполь-дипольный вклад в $\{D\}$ -тензор был вычислен с учётом структурных данных. Так как из эксперимента не представлялось возможным определить знак расщепления триплетного состояния в нулевом магнитном поле, расчёты дают два возможных набора тензора анизотропного обменного взаимодействия:

- 1) $J_x = -0.182 \text{ см}^{-1}$, $J_y = 0.065 \text{ см}^{-1}$, $J_z = 0.117 \text{ см}^{-1}$;
- 2) $J_x = 0.343 \text{ см}^{-1}$, $J_y = -0.166 \text{ см}^{-1}$, $J_z = -0.177 \text{ см}^{-1}$.

При обсуждении обменного взаимодействия между редкоземельными ионами обычно считают, что анизотропия обменного взаимодействия на эффективных спинах является только следствием перехода к эффективному спину, и тогда параметры эффективного $\{g\}$ -тензора и $J_{x,y,z}$ связаны простым соотношением [13]:

$$J_{x,y,z} = \frac{(g_1 - 1)^2 J_0}{g_1^2} \left(g_{x,y,z}^2 - \frac{1}{3}(g_x^2 + g_y^2 + g_z^2) \right),$$

где g_1 – фактор Ланде, равный 8/11 для иона неодима; J_0 – параметр изотропного обмена между истинными спинами. Анализ наших результатов показал, что анизотропия обменного взаимодействия на эффективных спинах Nd^{3+} в I имеет более сложную природу, чем ожидалось в модели изотропного обменного взаимодействия на истинных спинах. Этот вывод, несомненно, представляет интерес и требует дальнейшего теоретического рассмотрения.

Теоретические спектры, рассчитанные для двухъядерного кластера $\text{Nd}^{3+}\text{-Nd}^{3+}$ и представленные на рис. 3, достаточно точно воспроизводят экспериментальные спектры на двух частотах, за исключением сигнала в $H \sim 2300$ Э, который присутствует в экспериментальном спектре в X-диапазоне (рис. 3а, узкий сигнал в области $H \sim 3380$ Э обусловлен калибровочным радикалом). Причём соотношение интенсивностей дополнительного сигнала в $H \sim 2300$ Э и основного спектра растёт с повышением температуры в области $T = 4.2\text{--}14$ К.

Так как, согласно структурным данным, двухъядерные кластеры в соединении I не являются полностью изолированными, а имеются мостиковые фрагменты, которые связывают кластеры друг с другом, то необходимо было изучить влияние взаимодействия между кластерами

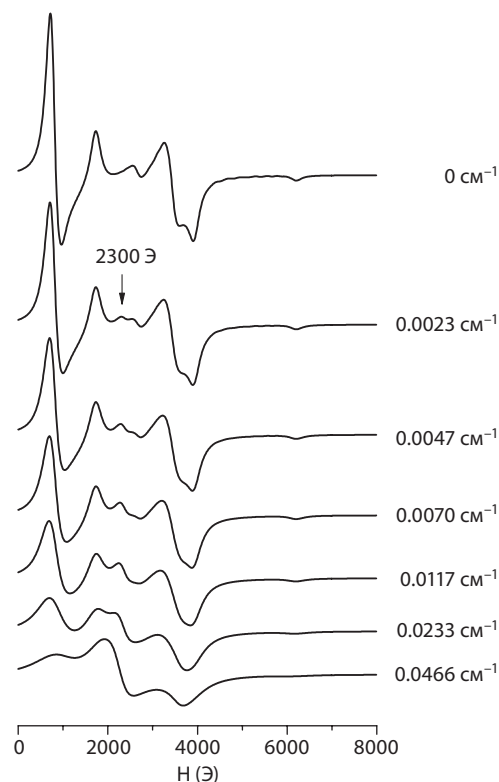


Рис. 4. Теоретические спектры ЭПР для взаимодействующих двухъядерных кластеров с $S_1 = S_2 = 1/2$, $g_x = 3.2$, $g_y = 2.5$, $g_z = 1.45$, $J_x = -0.182 \text{ см}^{-1}$, $J_y = 0.065 \text{ см}^{-1}$, $J_z = 0.117 \text{ см}^{-1}$, $r_{12} = 0.445 \text{ нм}$, $\theta = 90^\circ$, $\varphi = 0^\circ$. Справа указаны величины параметра межкластерного взаимодействия.

на форму спектров ЭПР. Форма спектра соединения I, построенного из фрагментов $\text{Nd}^{3+}\text{-Nd}^{3+}$, с учётом взаимодействия между кластерами вычислялась согласно [15]. Расчёты показали, что модельный спектр с величиной межкластерного обменного взаимодействия $J' = 0.0023 \text{ см}^{-1}$ удовлетворительно описывает экспериментальный спектр ЭПР при $T = 4.2$ К. В этой модели можно описать и наблюдаемое изменение соотношения интенсивностей дополнительного сигнала и основного спектра в области $T = 4.2\text{--}14$ К, предполагая, что величина J' изменяется с температурой. Однако для описания температурной зависимости спектров необходимо предположить, что при повышении температуры параметр J' увеличивается в несколько раз, что является неожиданным, так как структура не изменяется с повышением температуры.

В тоже время известно, что для ионов Nd^{3+} характерна существенная зависимость времён парамагнитной релаксации от температуры, поэтому мы проанализировали зависимость формы спектров ЭПР двухъядерных комплексов $\text{Nd}^{3+}\text{-Nd}^{3+}$ от времён парамагнитной релаксации T_1 и T_2 . С этой целью была составлена программа для моделирования спектров ЭПР двухъядерных комплексов с учётом релаксационных процессов. Расчёты показали, что учёт релаксационных процессов может приводить к усреднению тонкой структуры спектра и появлению дополнительного сигнала, аналогично тому, как это

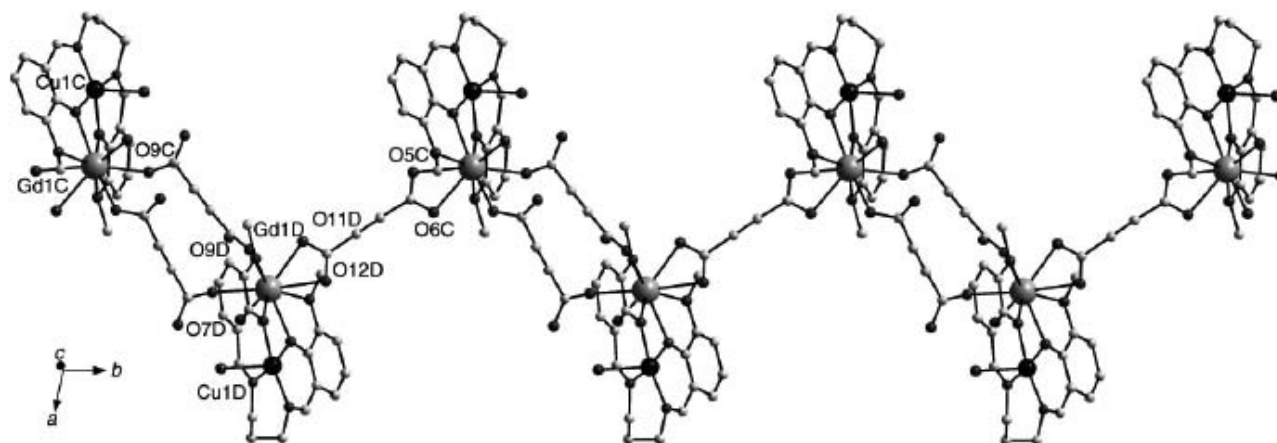


Рис. 5. Структура соединения II [17].

происходит при учёте обменного взаимодействия между кластерами.

Расчёты позволили установить степень влияния релаксационных процессов на форму спектров ЭПР. Так было показано, что при достаточно длинных временах, например $T_1 = 10^{-3}$ с, дополнительный сигнал в спектре не проявляется, при уменьшении T_1 , когда T_1 становится сравнимым с T_2 , дополнительный сигнал проявляется наиболее отчётливо.

Для соединения I $T_1 = 10^{-3}$ с и $T_2 = 430$ нс были экспериментально измерены при $T = 3.9$ К.

Анализ расчётов и экспериментальных данных позволяет предполагать, что особенности формы спектра ЭПР соединения I обусловлены как проявлением взаимодействия между кластерами, так и релаксационными процессами. Вероятно, наблюдение дополнительного сигнала при $T \sim 4$ К есть следствие взаимодействия между кластерами, что позволяет оценить величину этого взаимодействия, а относительный рост интенсивности дополнительного сигнала с увеличением температуры происходит из-за уменьшения времени релаксации T_1 . Более подробно результаты исследования представлены в [16].

ЭПР соединения $[\text{LCu}_2\text{Gd}_3(\text{acdca})_{1.5}(\text{H}_2\text{O})_2] \cdot 13\text{H}_2\text{O}$

Соединение $[\text{LCu}_2\text{Gd}_3(\text{acdca})_{1.5}(\text{H}_2\text{O})_2] \cdot 13\text{H}_2\text{O}$ (II) (рис. 5) представляет собой цепочку, построенную из димерных фрагментов медь-гадолиний [17]. Для двухъядерного кластера $\text{Cu}(S_1=1/2)\text{-Gd}(S_2=7/2)$ спектр ЭПР ожидается как сумма спектров от двух мультиплетов с $S = 3$ и 4, относительная интенсивность которых зависит от характера (ферромагнитного или антиферромагнитного) обменного взаимодействия и от температуры. На рис. 6 представлены экспериментальные спектры при комнатной температуре и при $T = 4.2$ К, которые демонстрируют некоторое изменение формы спектра и сдвиг одного из сигналов при понижении температуры. Из сравнения рассчитанных и экспериментальных спектров ЭПР было установлено, что

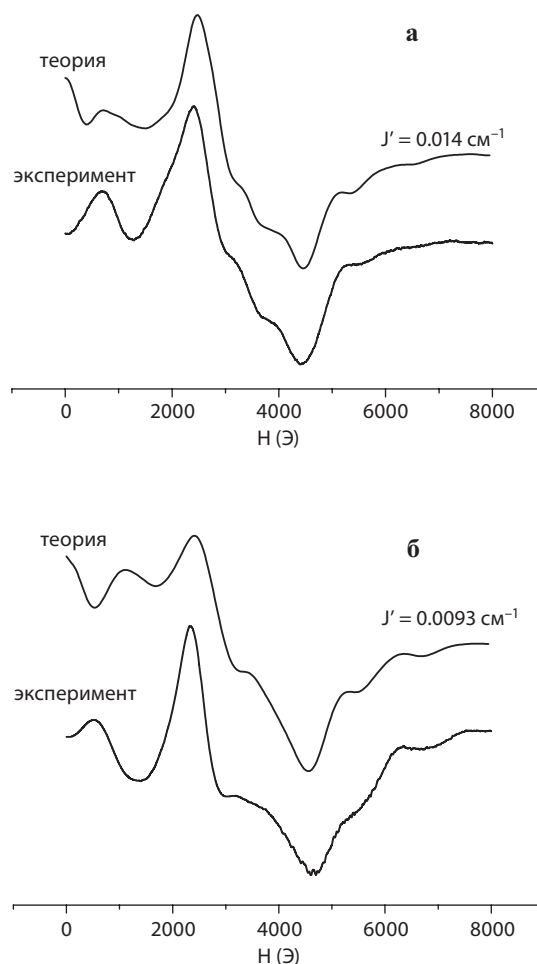


Рис. 6. Экспериментальный спектр ЭПР поликристаллического образца соединения II в X-диапазоне и теоретический спектр ЭПР для взаимодействующих двухъядерных кластеров с $S_1 = 1/2$, $S_2 = 7/2$, $J = -6$ см $^{-1}$, $g_{x1} = g_{y1} = 2.07$, $g_z = 2.2$, $g_2 = 1.99$, $D_2 = 0.07$ см $^{-1}$, $E_2 = 0.019$ см $^{-1}$. а $T = 295$ К, параметр межкастерного взаимодействия $J' = 0.014$ см $^{-1}$. б $T = 4.2$ К, параметр межкастерного взаимодействия $J' = 0.0093$ см $^{-1}$.

между ионами меди и гадолиния реализуется ферромагнитный характер обменного взаимодействия. Однако расчёты показали, что в модели изолированного двухъядерного кластера Cu-Gd экспериментально наблюдаемая температурная зависимость спектра полностью не описывается. Учёт взаимодействия между кластерами существенно улучшает согласие теории с экспериментом. Как и в случае соединения I, наилучшее согласие теории с экспериментом наблюдается в предположении, что величина J' уменьшается при понижении температуры (рис. 6). В данном случае учёт релаксационных процессов не может объяснить наблюдаемое изменение формы спектра, так как для ионов Cu^{2+} и Gd^{3+} не характерно существенное уменьшение времён релаксации T_1 и T_2 при повышении температуры, как это имеет место для ионов Nd^{3+} , и которое требуется предположить, чтобы описать наблюдаемые изменения спектров с повышением температуры. Мы считаем, что незначительное уменьшение величины J' для описания низкотемпературного спектра, вероятно, связано с антиферромагнитным характером обменного взаимодействия между кластерами. В этом случае при понижении температуры можно ожидать уменьшение эффективного параметра взаимодействия между кластерами за счёт возникновения фрагментов с $S = 0$.

Выводы

Представленные результаты, прежде всего, демонстрируют, что детальный анализ формы спектров ЭПР, основанный на согласовании экспериментальных и численно рассчитанных спектров, позволяет получить информацию о слабых по величине взаимодействиях между кластерами. Кроме того, в работе проанализированы возможные изменения спектров ЭПР в зависимости от времён релаксации T_1 и T_2 взаимодействующих центров. Ранее мы уже рассчитывали спектры ЭПР с учётом обменного взаимодействия и релаксационных процессов, но тогда основное внимание было уделено изменению формы спектров ЭПР относительно медленно релаксирующего иона в зависимости от скорости релаксации быстрорелаксирующего партнёра [18]. В данном случае рассмотрено изменение формы спектров двухъядерных кластеров за счёт изменения скорости релаксации обоих партнёров. В частности, для соединения, которое построено из двухъядерных кластеров $\text{Nd}^{3+}\text{-Nd}^{3+}$, установлено, что изменение времени релаксации T_1 может привести к таким же особенностям формы спектров ЭПР, как и учёт обменного взаимодействия между кластерами.

Заслуживают внимания и данные об анизотропии обменного взаимодействия между ионами неодима в кластере $\text{Nd}^{3+}\text{-Nd}^{3+}$. Численный анализ спектров ЭПР соединения I на двух частотах позволил определить анизотропию параметров спин-спинового взаимодействия. Установлено, что основной вклад в эти параметры даёт анизотропия обменного взаимодействия между ионами

неодима и достаточно точно определены параметры, описывающие анизотропию обменного взаимодействия на эффективных спинах. Анализ этих параметров показал, что анизотропия обменного взаимодействия на эффективных спинах не описывается общепринятыми соотношениями, полученными в предположении изотропного обменного взаимодействия на истинных спинах [10].

* * *

Исследования поликристаллических образцов в X-диапазоне проведены на спектрометре фирмы Брукер EMX/plus с температурной приставкой ER 4112HV, исследования соединения I в Q-диапазоне при $T = 4.2$ К выполнены на спектрометре фирмы Вариан E-12. Времена релаксации T_1 и T_2 измерены на импульсном спектрометре фирмы Брукер Eleksys-580 при $T = 3.9$ К.

Соединение I синтезировано и предоставлено для исследования К. И. Туртэ и Д. Продиусом (Институт химии Академии наук Молдовы, Кишинёв), соединение II – М. Андрухом (Факультет химии Университета г. Бухареста, Румыния).

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ “Ведущие научные школы” (НШ-4531.2008.02).

Литература

1. Voronkova V.K., Galeev R.T., Shova S., Novitchi G., Turta C.I., Caneschi A., Gatteschi D., Lipkowski J., Simonov Yu.A.: Appl. Magn. Reson. **25**, 227–247 (2003)
2. Воронкова В.К., Галеев Р.Т., Мингалиева Л.В., Суханов А.А.: Казанский физико-технический институт имени Е. К. Завойского 2006. Ежегодник, с. 60–65. Казань: ФизтехПресс 2007.
3. Galeev R.T., Voronkova V.K., Mingalieva L.V., Novitskii G., Turte C.I.: Appl. Magn. Reson. **33**, 73–84 (2008)
4. Sukhanov A., Galeev R., Mingalieva L., Voronkova V.K., Gheorghe R., Andruh M.: Appl. Magn. Reson. **35**, 613–623 (2009)
5. Baker J.M.: Phys. Rev. A **136**, 1341–1347 (1964)
6. Baker J.M., Riley J.D., Shore R.G.: Phys. Rev. **150**, 198–199 (1966)
7. Baker J.M.: Rep. Prog. Phys. **34**, 109–173 (1971)
8. Brower K.L., Stapleton H.J., Brower E.O.: Phys. Rev. **146**, 233–243 (1966)
9. Clemens J.M., Hutchinson C.A.: Phys. Rev. B **28**, 50–66 (1983)
10. Guillot-Noel O., Mehta V., Viana B., Gourier D., Boukhris M., Jandl S.: Phys. Rev. B **61**, 15338–15346 (2000)
11. Guillot-Noel O., Goldner Ph., Higel P., Gourier D.: J. Phys.: Condens. Matter **16**, R1–R24 (2004)
12. Gafurov M.R., Iskhakova A.I., Kurkin I.N., Kurzin S.P., Malkin B.Z., Nikitin S.I., Orlinskii S.B., Rakhmatullin R.M., Shakurov G.S., Tarasov V.F., Demirbilek R., Heber J.: SPIE Proc. **4766**, 279–291 (2002)
13. Абрагам А., Блيني Б.: Электронный парамагнитный резонанс переходных ионов, т.1. М.: Мир 1970. 651 с.
14. Яблоков Ю.В., Воронкова В.К., Мосина Л.В.: Парамагнитный резонанс обменных кластеров. М.: Наука 1988. 181 с.
15. Voronkova V., Galeev R., Korobchenko L., Madalan A., Andruh M., Kravtsov V., Simonov Yu.: Appl. Magn. Reson. **28**, 297–310 (2005)
16. Mingalieva L.V., Voronkova V.K., Galeev R.T., Sukhanov A.A., Melnik S., Prodius D., Turta K.I.: Appl. Magn. Reson. **37**, 737–750 (2010)
17. Gheorghe R., Cucos P., Andruh M., Costes J.-P., Donnadieu B., Shova S.: Chem. Eur. J. **12**, 187–203 (2006)
18. Salikhov K.M., Galeev R.T., Voronkova V.K., Yablokov Yu.V., Legendziewicz J.: Appl. Magn. Reson. **14**, 457–472 (1998)

ЭПР интерметаллида YbRh_2Rb

А. А. Суханов, В. А. Иваньшин

Отдел химической физики, лаборатория спиновой физики и спиновой химии

Впервые для интерметаллида YbRh_2Rb , обладающего эффектом Кондо, обнаружен сигнал электронного парамагнитного резонанса. Представлены экспериментальные данные и анализ температурных зависимостей ширины линии ЭПР и величины g -фактора. Из сравнения данных ЭПР для YbRh_2Pb , YbRh_2Si_2 и YbIr_2Si_2 оценены возможные эффекты f - d -р гибридизации. Сделано предположение, что степень f -р гибридизации в YbRh_2Pb уменьшается из-за менее эффективного смешивания волновых функций $4f$ - и $6p$ -оболочек по сравнению с $4f$ - $3p$ гибридизацией в YbRh_2Si_2 .

Введение

В последнее время резко возрос интерес к исследованию концентрированных кондо-систем на основе урана, церия, иттербия и других $4f$ - и $5f$ -элементов. Конкуренция нескольких взаимодействий различной природы (кристаллического электрического поля (КЭП)), косвенного межспинового Рудермана-Киттеля-Касуя-Иосиды (РККИ) взаимодействия, гибридизации f -орбиталей с зонными состояниями, экранирования локализованных магнитных моментов f -ионов вследствие эффекта Кондо и т.д.) определяет магнитные, зачастую уникальные, свойства таких концентрированных систем [1].

До недавнего времени считалось, что сигналы ЭПР не наблюдаются в концентрированных кондо-системах. Этот факт экспериментально установлен и объяснён большой скоростью релаксации спинов в электронном газе [2], которая приводит к большой ширине линии ЭПР. ЭПР-исследование спиновой динамики кондо-систем было возможным только при дополнительном допировании системы спиновыми метками, обычно ионами Gd^{3+} . Однако, концентрированные кондо-системы YbRh_2Si_2 и YbIr_2Si_2 явились исключением. Для них были обнаружены сигналы ЭПР с явными свойствами локальных моментов иона Yb^{3+} , и было удивительно, что сигнал ЭПР наблюдался ниже температуры Кондо (T_K), когда локальные моменты иона Yb^{3+} экранируются из-за резко выраженного кондо-взаимодействия [3, 4]. Недавние теоретические работы [5, 6] связывают наблюдение ЭПР в кондо-системах с процессами гибридизации $4f$ -электронов с электронами зоны проводимости при наличии в системе ферромагнитных флуктуаций, которые приводят к существенному сужению резонансной линии и, следовательно, к возможности её наблюдения. Механизмы такой гибридизации пока мало изучены, и для их понимания представляется важным изучение влияния состава кондо-систем на проявляемые свойства. В данной работе представлены результаты исследования интерметаллида YbRh_2Rb , близкого по составу к изученной ранее кондо-системе YbRh_2Si_2 .

Эксперимент

Интерметаллид YbRh_2Rb проявляет эффект Кондо при $T < 0.5$ К [7]. Это соединение относится к группе тройных сплавов Гейслера со стехиометрическим соотношением X_2YZ , где X , Y – переходные металлы, Z – элемент III–V групп. Образцы представляли собой небольшие ($0.5 \times 0.2 \times 3$ мм³) монокристаллы. Рентгеноструктурный анализ [7] выявил двойникование их кристаллической структуры, тетрагональную симметрию элементарной ячейки, а также наличие включений свинца (менее 1%) и ещё более малых фракций RhPb_2 . Установлено, что парамагнитная восприимчивость χ следует закону Кюри-Вейса в диапазоне температур 100–300 К с температурой Вейса $\Theta = -1.9 \pm 0.1$ К и эффективным моментом $M_{\text{eff}} = 3.3 \pm 1 \mu_B$ [7]. При $T < 20$ К наблюдается отклонение температурной зависимости $1/\chi$ от линейного закона, а антиферромагнитное упорядочение наступает ниже $T_N \approx 0.57$ К.

Измерения ЭПР-спектров проводились на спектрометре фирмы Брукер EMX/plus с гелиевым продувом фирмы Oxford.

В спектре ЭПР монокристалла данного соединения в диапазоне температур от 4 до 25 К наблюдается одиночный сигнал ЭПР с дайсоновской формой линии (рис. 1), угловая зависимость величины g -фактора для наблюдаемого сигнала не обнаружена (угловая зависимость спектра изучена для произвольной плоскости монокристалла). Значение g -фактора $g \sim 3.4$ при $T = 5$ К является характерным для иона Yb^{3+} [2, 3]. Ширина сигнала ЭПР ΔH растёт от 500 Э до более, чем 2000 Э при повышении температуры, то есть изменяется примерно в том же диапазоне, что и для соединения YbRh_2Si_2 [3, 8]. Однако, интенсивность сигнала для YbRh_2Pb примерно в 30–40 раз меньше (в образцах приблизительно одинакового веса и размера и при идентичных условиях регистрации) и была сопоставима с интенсивностью фонового (паразитного) сигнала резонатора (указанный стрелкой сигнал на рис. 1).

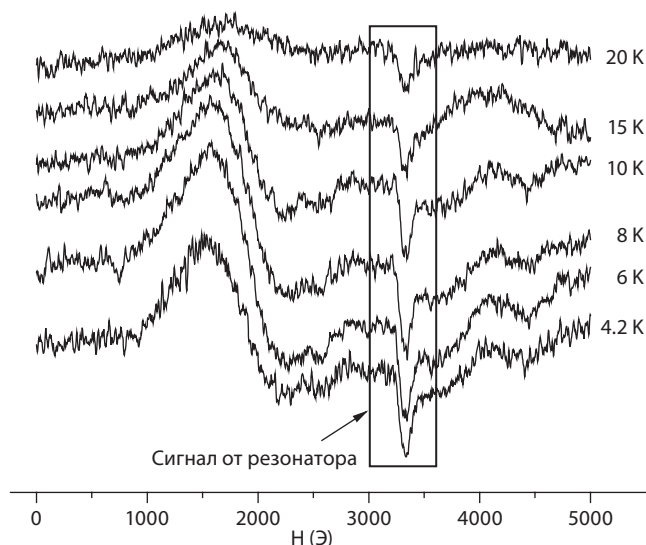


Рис. 1. Спектры ЭПР интерметаллида YbRh_2Pb при некоторых температурах.

Обсуждение

Анализ спектров ЭПР соединения YbRh_2Pb показал, что температурная зависимость ширины линии ЭПР ΔH (рис. 2) описывается ранее предложенной формулой для подобных систем [3, 4]:

$$\Delta H = A + BT + C \exp(-\Delta/T), \quad (1)$$

где $A = 424 \pm 15$ Э, $B = 27 \pm 2$ Э/К, $C = 69.5 \pm 2$ Э, $\Delta = 73.5$ К.

Параметр A описывает вклад, обусловленный спин-спиновыми взаимодействиями и неоднородным уширением линии ЭПР, а слагаемое BT представляет собой вклад в ΔH от корринговской релаксации. Третье слагаемое в соотношении (1) описывает тепловые флуктуации электронных состояний ионов Yb^{3+} , которые приводят к случайным переходам этих ионов с основного на первый возбуждённый штатковский подуровень с энергией активации $\Delta = 73.5$ К. Этот механизм, предложенный в [3] для описания температурной зависимости параметров спектров ЭПР в YbRh_2Si_2 , ответственен и за температурную эволюцию g -фактора (рис. 3), представленную соотношением

$$g(T) = g_0 + \Delta g_0 \exp(-\Delta/T), \quad (2)$$

$$\Delta g_0 = g_{\text{exc}} - g_0,$$

где g_0 и g_{exc} – эффективные g -факторы основного и первого возбуждённого подуровней иона Yb^{3+} .

Таким образом, температурные зависимости параметров ЭПР отражают характерные для кондо-систем изменения их свойств с повышением температуры – переход от смешанного коррелированного состояния из локализованных

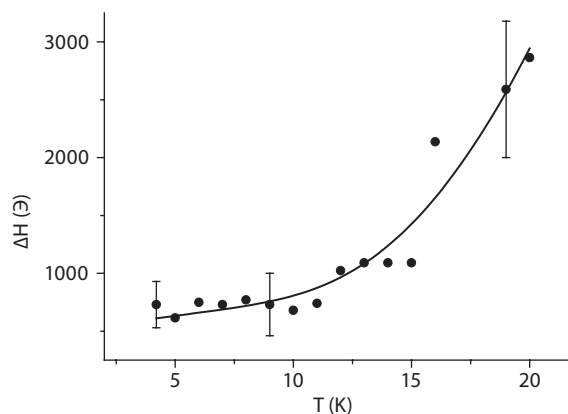


Рис. 2. Температурная зависимость ширины линии ЭПР для соединения YbRh_2Pb . ● – эксперимент, сплошная линия – результат расчёта по формуле (1) с параметрами $A = 424$ Э, $B = 27$ Э/К, $C = 69.5$ Э, $\Delta = 73.5$ К.

4f-состояний Yb^{3+} и 3d-электронов ионов Rh^{3+} к парамагнитному состоянию с магнитными моментами 4f-оболочек, близких к магнитным моментам свободных ионов Yb^{3+} при $T > 12$ К. Физические свойства кондо-системы при этом обусловлены двумя конкурирующими взаимодействиями – косвенным обменным взаимодействием РККИ и гибридизацией, т.е. смешиванием волновых функций локализованных 4f-электронов и коллективизированных электронов незаполненных d-, s- и p-оболочек.

Электронные и магнитные свойства сплавов Гейслера X_2YZ в значительной степени определяются как X-Y гибридизацией, так и X-Z гибридизацией [9]. Степень такой гибридизации (величины перекрытия волновых функций) существенно зависит от изменения химического состава. Сравнение данных ЭПР соединений YbRh_2Pb , YbRh_2Si_2 [3] и YbIr_2Si_2 [4] позволяет оценить вероятные эффекты f-d-p гибридизации. Например, замещение родия (с конфигурацией внешних электронных оболочек Rh^{3+} ($[\text{Kr}]4d^85s^2$) иридием Ir^{3+} ($[\text{Xe}]5d^76s^2$) при

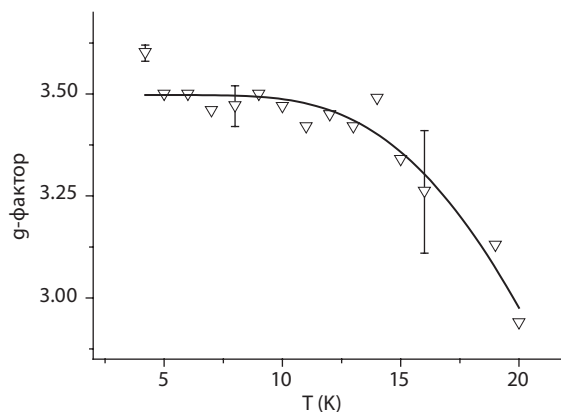


Рис. 3. Температурная зависимость g -фактора: ▽ – эксперимент, сплошная линия – результат расчёта по формуле (2) с $\Delta g_0 = -18.5 \pm 1.5$ и $g_{\text{exc}} = -15.1 \pm 1.5$.

переходе от YbRh_2Si_2 к YbIr_2Si_2 привело к значительному уменьшению вклада коллективизированных электронов в процессы парамагнитной релаксации, но не оказало заметного влияния на интенсивность сигнала ЭПР. Можно предположить, что причиной этого является ослабление f-d гибридизации вследствие уменьшения количества d-электронов на внешней 5d-оболочке иридия. Степень f-p гибридизации в YbRh_2Pb при замене кремния Si ($[\text{Ne}]3s^23p^2$) на свинец Pb ($[\text{Hg}]6p^2$) могла значительно уменьшиться из-за менее эффективного смешивания волновых функций 4f- и 6p-оболочек по сравнению с 4f-3p гибридизацией в YbRh_2Si_2 , что и послужило причиной значительного ослабления интенсивности сигнала ЭПР в сплаве со свинцом [10].

Авторы благодарны Д. А. Соколову и М. К. Аронсон (Университет штата Мичиган, США) за предоставленные для исследований образцы монокристаллов YbRh_2Pb .

Литература

1. Reyes Calvo M., Fernández-Rossier J., Palacios J. J., Jacob D., Natelson D., Untiedt C.: *Nature* **458**, 1150–1153 (2009)
2. Wright F.: *J. Phys.: Condens. Matter* **71**, 6097–6116 (1995)
3. Иваньшин В.А., Аминов Л.К., Куркин И.Н., Зицельшмидт Й., Штокерт О., Ферстль Ю., Гайбель К.: *Письма в ЖЭТФ* **77**, 625–628 (2003)
4. Sichelschmidt J., Wyk Hoff J., Krug von Nidda H.-A., Fazlishanov I.I., Hossain Z., Krellner C., Geibel C., Steglich F.: *J. Phys.: Condens. Matter* **19**, 016211–0162212 (2007)
5. Schlottmann P.: *Phys. Rev.* **79**, 045104–045110 (2009)
6. Abrahams E., Wölfle P.: *Phys. Rev. B* **78**, 104423–104431 (2008)
7. Sokolov D.A., Kim M.S., Aronson M.C., Henderson C., Stephens P.W.: *Phys. Rev. B* **77**, 174401–174406 (2007)
8. Sichelschmidt J., Ivanshin V.A., Ferstl J., Geibel C., Steglich F.: *Phys. Rev. Lett.* **91**, 156401–156405 (2003)
9. Еремеев С.В., Кульков С.С., Кулькова С.Е.: *ФТТ* **50**, 250–261 (2008)
10. Иваньшин В.А., Литвинова Т.О., Суханов А.А., Соколов Д.А., Аронсон М.К.: *Письма в ЖЭТФ* **90**, 126–129 (2009)

Электронная диффузия и быстрая релаксация в CdS

К. В. Иванин, А. В. Леонтьев, В. С. Лобков, В. В. Самарцев, Г. М. Сафиуллин

Отдел химической физики, лаборатория быстротекущих молекулярных процессов; лаборатория нелинейной оптики

Представлены результаты экспериментов по измерению времени релаксации и коэффициента диффузии электронов внутри запрещённой зоны кристалла сульфида кадмия при комнатной температуре. Получено значение времени релаксации электронов, равное 600 пс, и коэффициента диффузии $1.5 \text{ см}^2/\text{с}$. Обнаружена короткая составляющая в спаде сигнала наведённой решётки при энергии импульсов накачки, превышающей 1.3 мкДж с характерным временем 4.5 пс.

Введение

В последнее время различные методы фемтосекундной лазерной спектроскопии получили широкое распространение при исследованиях быстротекущих процессов в различных средах [1]. Использование техники нелинейной спектроскопии даёт возможность получить информацию о динамике фазовой релаксации и населённости возбуждённых состояний в полупроводниках, которую зачастую невозможно исследовать другими спектроскопическими методами.

В экспериментальных работах [2, 3] описано и подробно обсуждалось двухфотонное поглощение фемтосекундных лазерных импульсов с энергией кванта 2 эВ в полупроводниковом монокристалле CdS с последующим сверхкоротким (400 фс) излучением на частоте, соответствующей ширине запрещённой зоны 2.45 эВ. В работе [4], посвящённой оптическим свойствам нанокристаллов на основе CdS, исследован, наряду с многофотонным поглощением и переходом электрона в зону проводимости, процесс, сопровождающийся переходом электрона на глубокие уровни. Наше исследование сосредоточено на изучении таких уровней “ловушек”, лежащих внутри запрещённой зоны.

Эксперимент и обсуждение результатов

Исследуемый образец представлял собой монокристалл CdS толщиной 1 мм, оптическая ось которого направлена нормально к поверхности. Используемые в описанных ниже экспериментах лазерные импульсы имели следующие параметры: длительность 50–60 фс, спектр шириной 40 нм с максимумом на длине волны 790 нм, энергия импульса варьировалась в пределах 0.4–0.7 мкДж. Подробное описание лазерной системы можно найти, например, в работе [5].

Время жизни уровня “ловушек” определено в эксперименте по наблюдению наведённого пропускания с временным разрешением по схеме “накачка-зондирование”.

Лазерные импульсы с энергией 0.4 мкДж (накачка) и 0.02 мкДж (зондирующий) сфокусированы линзой в участок образца диаметром ~ 50 мкм. Временной интервал между ними может быть установлен с использованием оптической линии задержек в интервале 0–150 пс. При прохождении мощного импульса накачки через образец, исследуемый уровень, перекрываясь полосой излучения лазера, частично населяется. Динамику релаксации можно увидеть, наблюдая прохождение зондирующего импульса, задержанного на Δt относительно накачки. Зависимость степени прозрачности образца от задержки Δt показана на рис. 1. Характерное время спада населённости уровня составило 550 пс.

Для определения подвижности носителей заряда поставлен эксперимент по исследованию наведённых решёток населённости. При интерференции двух лазерных пучков накачки, сфокусированных в образце, возникает периодическое распределение электромагнитного поля и повторяющая его динамическая периодическая решётка концентрации возбуждённых носителей (см. рис. 2). Угол между пучками θ (значит и период решётки $\Lambda =$

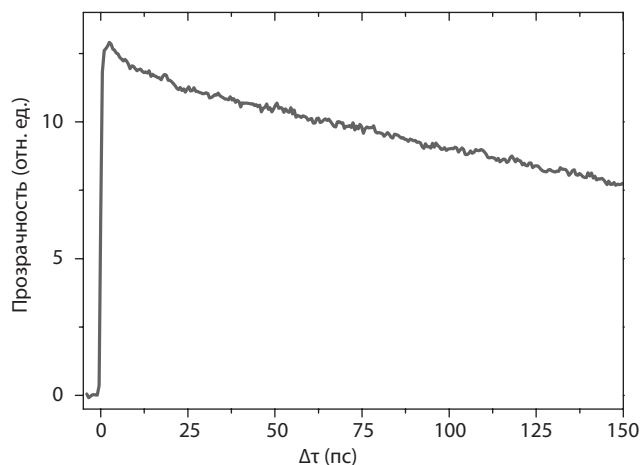


Рис. 1. Зависимость степени прозрачности образца от времени после импульса накачки Δt .

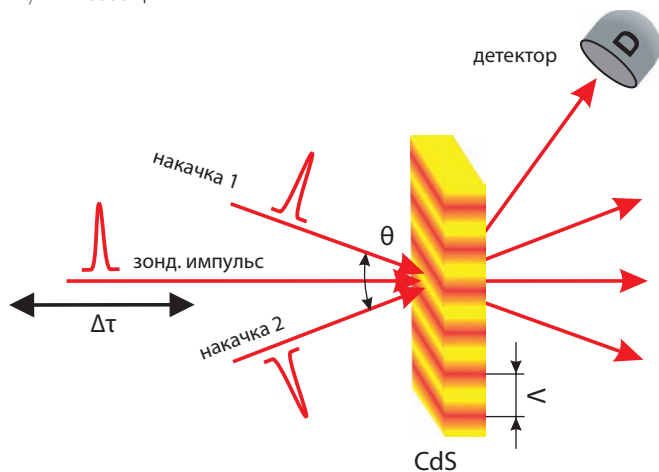


Рис. 2. Схема наблюдения дифракции лазерного импульса на наведённой решётке населённости.

$\lambda[2\sin(\theta/2)]^{-1}$ определяется фокусным расстоянием линзы; использованы линзы с фокусным расстоянием 45, 75, 85 и 125 мм. Регистрируя интенсивность зондирующего пучка, испытавшего дифракцию на такой решётке, в зависимости от его запаздывания Δt относительно пучков накачки, можно проследить процесс разрушения решётки. На рис. 3 показаны спады наведённых решёток населённости при разных значениях постоянной Λ .

В простейшей модели, предполагая, что основную роль в разрушении наведённой решётки играют процессы релаксации и диффузии, скорость разрушения решётки выражается через Λ следующим образом:

$$\frac{1}{T_{gr}} = \frac{8\pi^2}{\Lambda^2} D + \frac{2}{T_r}, \quad (1)$$

где T_r – время жизни уровня, D – коэффициент диффузии носителей. В (1) учтены только члены, независимые от концентрации.

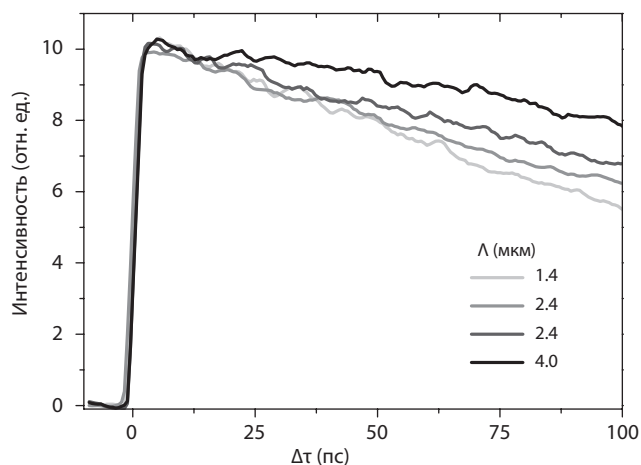


Рис. 3. Зависимость интенсивности продифрагировавшего зондирующего пучка от интервала времени после наведения решётки Δt для разных значений постоянной Λ .

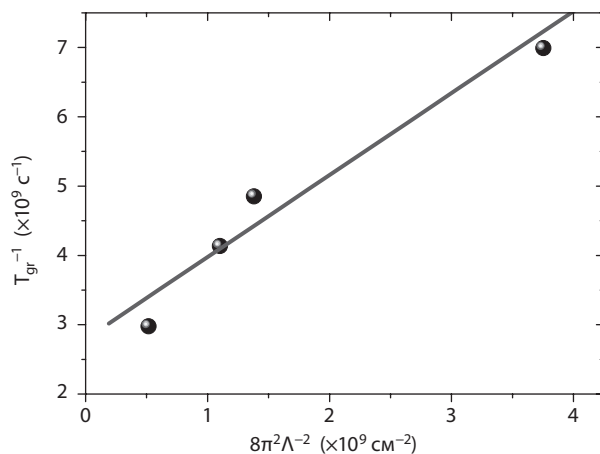


Рис. 4. Зависимость скорости распада наведённой решётки от периода решётки.

На рис. 4 построена зависимость в координатах $8\pi^2/\Lambda^2$ – скорость распада решётки $1/T_{gr}$. Согласно (1), тангенс угла наклона аппроксимирующей прямой к оси абсцисс равен коэффициенту диффузии, а длина отсекаемого ею отрезка оси ординат пропорциональна скорости релаксации $1/T_r$. Вычисленное таким способом значение времени релаксации составило 600 пс, что хорошо совпадает с результатом эксперимента “накачка-зондирование”, а коэффициента диффузии – $1.5 \text{ см}^2/\text{с}$. Это соответствует значению подвижности носителей $60 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$. Подвижность свободных электронов в CdS составляет $265 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ [6].

Если энергия импульсов накачки превышает пороговое значение в 1.3 мкДж ($\sim 100 \text{ ГВт}/\text{см}^2$), кривая спада эффективности наведённой решётки обнаруживает участок быстрой релаксации (рис. 5). Характерное время этого процесса составляет 4.5 пс, и, в пределах ошибки измерения, не зависит от постоянной решётки Λ .

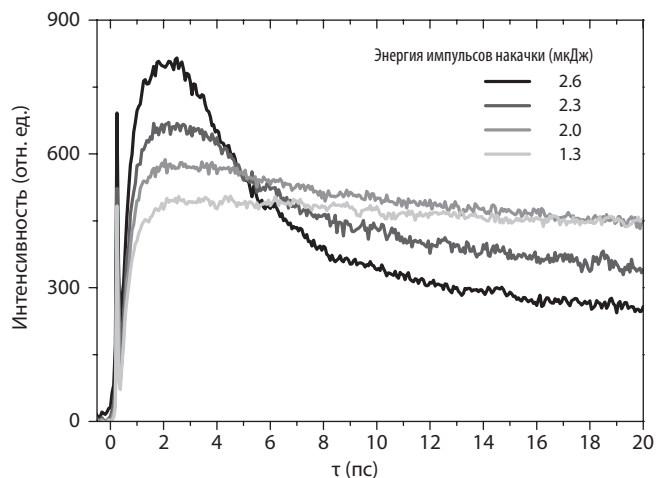


Рис. 5. Зависимость интенсивности продифрагировавшего зондирующего пучка от Δt для разных значений энергии импульса накачки.

Следовательно, наблюдаемая быстрая релаксация происходит без существенного участия диффузии. В работе [7] предложено объяснение присутствия быстроспадающего участка в кривой релаксации возбуждённых электронов влиянием вынужденного излучения [7, 8].

Работа выполнена в рамках Программы Президиума РАН “Квантовая физика конденсированных сред” и ОФН РАН “Фундаментальная спектроскопия и её применения”, гранта Президента РФ “Ведущие научные школы” (НШ 4531.2008.2), грантов Российского фонда фундаментальных исследований (№ 09-02-00136а, № 08-02-00032а и № 08-02-90001Бел.а).

Литература

1. Козлов С.А., Самарцев В.В.: Оптика фемтосекундных лазеров. С.-Петербург: ИТМО 2007. 291 с.
2. Lami F., Gilliot P., Hirlimann C.: Phys. Rev. B **60**, no. 7, 4763–4770 (1999)
3. Lami F., Gilliot P., Hirlimann C.: Phys. Rev. Lett. **77**, no. 8, 1632–1635 (1996)
4. Chon J.W.M., Min Gu, Bullen C., Mulvaney P.: Appl. Phys. Lett. **84**, no. 22, 4472–4474 (2004)
5. Никифоров В.Г., Сафиуллин Г.М., Шмелёв А.Г., Леонтьев А.В., Лобков В.С.: Казанский физико-технический институт имени Е. К. Завойского 2007. Ежегодник, с. 29. Казань: ФизтехПресс 2008.
6. Spear W.E., Mort J.: Proc. Phys. Soc. **81**, 130–170 (1963)
7. Fox E.C., van Driel H.M.: Phys. Rev. B **47**, no. 3, 1663–1666 (1993)
8. Fox E.C., Canto-Said E.J., van Driel H.M.: Semicond. Sci. Technol. **7**, 183–186 (1992)

Спиновый транспорт в гетероструктуре GaAs/AlGaAs при комнатной температуре

К. В. Иванин, А. В. Леонтьев, В. С. Лобков, В. В. Самарцев

Отдел химической физики, лаборатория быстротекущих молекулярных процессов; лаборатория нелинейной оптики

Представлены результаты эксперимента по четырёхволновому смещению в гетероструктуре GaAs/AlGaAs при комнатной температуре. Получены значения коэффициента диффузии для спинов и электронов, равные 163.2 и 200 см²/с, соответственно. Определены времена релаксации спинов и электронов, которые составили 50.7 пс и 3 нс.

Спинтроника в настоящее время является предметом активных исследований многих лабораторий [1–3]. Электронные элементы и чипы памяти, оперирующие со спином электрона вместо его заряда, обещают стать значительно быстрее электронных аналогов и потреблять меньше энергии. Одной из основных проблем спинтроники на современном этапе исследований является поиск и изучение перспективных полупроводников с большим коэффициентом диффузии спинов и временем сохранения информации о спиновом состоянии. Существуют два основных пути управления и исследования спиновой степени свободы в полупроводниковых структурах – электрические и оптические методы. Представляется удобным использовать именно оптические методы, поскольку ориентация спинов носителей заряда даёт сильную оптическую нелинейность, нет необходимости создания контактов и источников спинового тока, при этом существует возможность управлять зарядовыми и спиновыми токами независимо.

В работе с помощью методики времязрешённого фемтосекундного четырёхволнового смещения исследовался распад наведённых спиновых решёток в гетеропереходе GaAs/AlGaAs. На границе раздела полупроводников с различной шириной запрещённой зоны возникает потенциальная яма, в которой находятся электроны в возбуждённом состоянии. Они сосредотачиваются вдоль гетероперехода вследствие электростатического взаимодействия с ионами n-AlGaAs, образуя квазидвумерную структуру, двумерный вырожденный электронный газ (ДВЭГ). Подвижность электронов значительно увеличивается вследствие наращивания промежуточного слоя недопированного узкозонного полупроводникового слоя (буферного слоя) AlGaAs между n-AlGaAs и GaAs. Этот буферный слой служит пространственным разделителем двумерного электронного газа и донорных ионов, таким образом, сокращая рассеяние на ионизированных примесях. Подвижность электронов поэтому может достигать значений $30 \cdot 10^6$ см²/В·с при плотности 2D электронов 10^{11} см⁻². Такая высокая подвижность зарядов не может быть достигнута в простом полупроводнике из-за рассеяния на примесях/донорах.

Интерференция двух одинаковых лазерных пучков с длиной волны λ , пересекающихся в образце под углом θ , приводит к образованию стоячей волны в плоскости образца в случае, если векторы электрического поля взаимодействующих волн E_1 и E_2 параллельны. При этом образуется периодическая структура – решётка концентрации возбуждённых электронов, повторяющая пространственное распределение электрического поля волн. Если же E_1 и E_2 взаимоперпендикулярны, величина суммарного поля распределена пространственно равномерно, однако поляризация в этом случае оказывается промодулированной (рис. 1а), меняясь при движении в плоскости образца от правой круговой до левой круговой (интерференция поляризации).

При оптическом возбуждении электронов ДВЭГ направление их спина зависит от поляризации возбуждающего света, поэтому пространственная модуляция поляризации приводит к образованию решётки ориентированных спинов (рис. 1б).

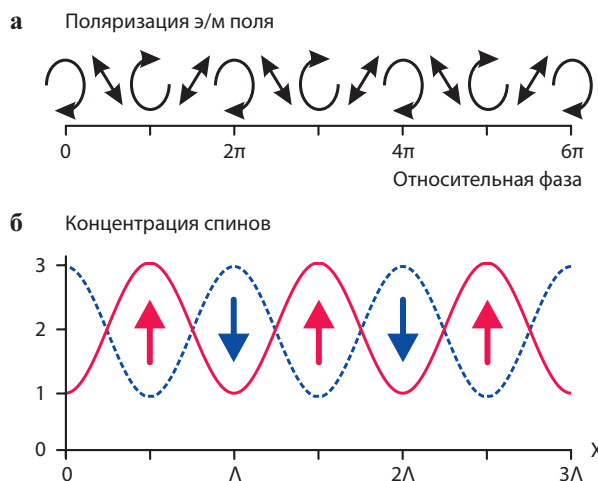


Рис. 1. Распределение электромагнитного поля в плоскости образца (а) и ориентация спинов электронов на образце (б). Сплошной и штриховой линиями показаны концентрации электронов со спином “вверх” и “вниз”, соответственно. Ось X направлена вдоль волнового вектора стоячей волны

Структура энергетических уровней ДВЭГ соответствует структуре чистого GaAs [4]. Ширина запрещённой зоны $E_g = 1.42$ эВ при $T = 295$ К, а величина спин-орбитального расщепления SO линии $\Delta_{SO} = 0.34$ эВ. Лазерное излучение с энергией кванта 1.58 эВ возбуждает только лёгкие и тяжёлые дырки, не возбуждая SO линию. Исходя из правил отбора для внутризонных переходов, воздействие импульса с, например, левой круговой поляризацией приведёт к соотношению концентраций возбуждённых электронов со спинами “вверх” и “вниз” как 3:1 [2].

В простейшей модели, в предположении, что основную роль в разрушении наведённой решётки играют процессы релаксации и диффузии, распад решётки описывается следующим уравнением [5, 6]:

$$\frac{1}{T_{gr}} = \frac{8\pi^2}{\Lambda^2} D + \frac{2}{T_r}, \quad (1)$$

где T_{gr} – время разрушения решётки, T_r – время релаксации спинов, D – коэффициент спиновой диффузии, $\Lambda = \lambda[2\sin(\theta/2)]^{-1}$ – период спиновой решётки.

Возбуждающие импульсы имели следующие параметры: длительность 50–60 фс, спектр шириной 40 нм с максимумом на длине волны 790 нм, энергия импульса составляла 0.4 мкДж. С использованием светоделителей были подготовлены три лазерных пучка равной интенсивности, в одном из пучков (зондирующем) установлена оптическая линия задержки. При помощи пластинки $\lambda/2$ и призмы Глана пучкам накачки придана взаимоперпендикулярная линейная поляризация.

Пучки фокусировались линзой с фокусным расстоянием 120, 170, 280 или 350 мм на образец. Выбор фокусного расстояния определял величину Λ . Анализируя кривые интенсивности продифрагировавшего на наведённой решётке зондирующего пучка в зависимости от временной задержки τ , можно извлечь характеристики процесса распада решётки (рис. 2).

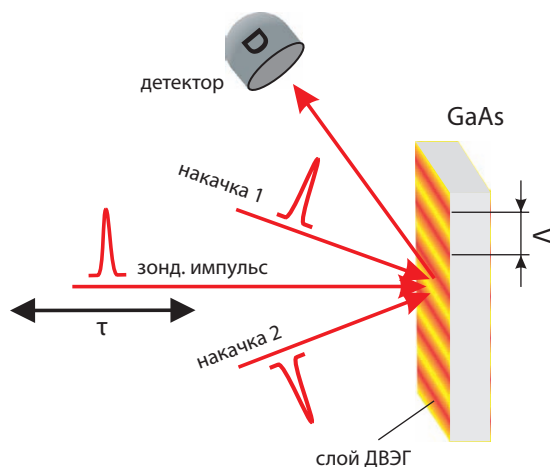


Рис. 2. Схема наблюдения дифракции лазерного импульса на наведённой спиновой решётке.

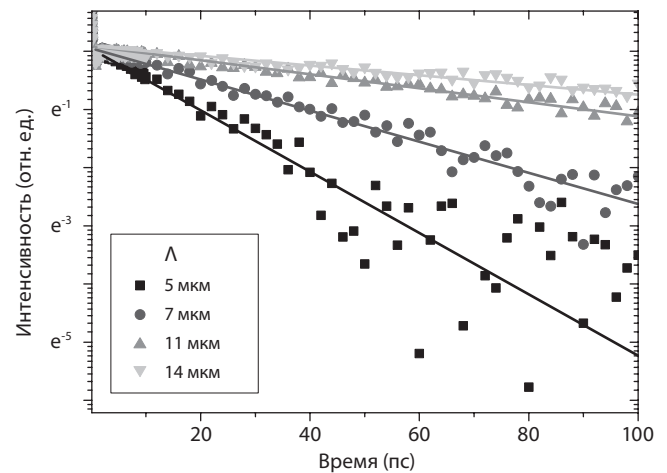


Рис. 3. Зависимость интенсивности дифрагировавшего луча от времени между первыми двумя импульсами и третьим для различных периодов решётки.

Экспериментальные результаты для нескольких периодов решётки при 295 К и результаты аппроксимации по простейшей модели (1) показаны на рис. 3, соответственно, точками и сплошными линиями. Уменьшение шага решётки ведёт к сокращению времени жизни решётки, что показывает растущую роль процесса диффузии. На рис. 4 построена зависимость в координатах скорости распада решётки $1/T_{gr} - (8\pi^2/\Lambda^2)$. Согласно (1), тангенс угла наклона аппроксимирующей прямой к оси абсцисс равен коэффициенту диффузии, а длина отсекаемого ею отрезка оси ординат пропорциональна скорости релаксации спинов T_r . Вычисленное таким способом значение коэффициента диффузии составило $163.2 \text{ см}^2/\text{с}$, а время релаксации – 50.7 пс для ДВЭГ при 295 К. Для определения коэффициента диффузии и времени релаксации электронов в ДВЭГ был проведён аналогичный эксперимент при параллельных поляризациях пучков накачки. Значение коэффициен-

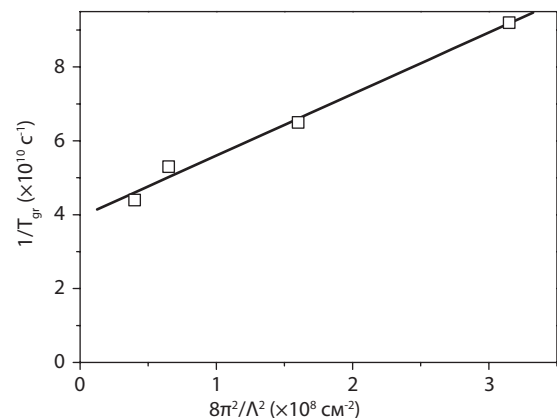


Рис. 4. Зависимость скорости распада наведённой решётки от периода решётки в координатах $8\pi^2/\Lambda^2$.

та диффузии электронов составило $200 \text{ см}^2/\text{с}$, а время релаксации электронов – 3 нс.

Работа выполнена в рамках Программы Президиума РАН “Квантовая физика конденсированных сред” и ОФН РАН “Фундаментальная спектроскопия и её применения”, гранта Президента РФ “Ведущие научные школы” (НШ 4531.2008.2), грантов Российского фонда фундаментальных исследований (№ 09-02-00136а, № 08-02-00032а и № 08-02-90001Бел.а).

Литература

1. Wolf S.A., Awschalom D.D., Buhrman R.A., Daughton J.M., von Molnar S., Roukes M.L., Chtchelkanova A.Y., Treger D.M.: *Science* **294**, 1488–1495 (2001)
2. Zutic I., Fabian J., Das Sarma S.: *Rev. Mod. Phys.* **76**, 323–410 (2004)
3. Schmidt G.: *J. Phys. D: Appl. Phys.* **38**, 107–122 (2005)
4. Meier F., Zakharchenya B.: *Optical orientation*. Amsterdam: North-Holland 1984. 523 p.
5. Adachi S., Takagi Y., Takeda J., Nelson K.A.: *Opt. Commun.* **174**, 291–298 (2000)
6. Eichler H., Gunther P., Pohl D.: *Laser induced dynamic gratings*. Berlin: Springer 1986. 267 p.

Лазерное управление когерентными осцилляциями молекул в жидкости в субпикосекундном диапазоне

А. Г. Шмелёв, В. Г. Никифоров, Г. М. Сафиуллин, В. С. Лобков

Отдел химической физики, лаборатория быстротекущих молекулярных процессов

На основе техники фемтосекундной поляризационной спектроскопии впервые экспериментально реализован контроль когерентных внутримолекулярных осцилляций в чистых жидкостях хлороформа и нитробензола при нормальных условиях. Для этого применено нерезонансное возбуждение среды последовательностью из двух линейно поляризованных лазерных импульсов длительностью 35 фс. Зондирование состояния среды основано на спектроскопии с пробными импульсами с регистрацией оптического эффекта Керра. Показано, что с помощью двух параметров (задержки между импульсами накачки и их относительной интенсивностью) достигается контроль колебательной динамики молекул в субпикосекундном диапазоне.

Введение

Нерезонансная времяразрешённая спектроскопия с регистрацией сверхбыстрого оптического эффекта Керра (ОЭК) является одним из эффективных методов исследования молекулярной динамики [1, 2]. Суть данного метода заключается в наведении линейно поляризованным фемтосекундным импульсом (накачка) нестационарной анизотропии среды. Спустя заданное время после накачивающего импульса состояние среды зондируется слабым пробным импульсом. Регистрируемый в эксперименте сигнал обусловлен изменением поляризации пробного импульса на выходе из образца и является результатом нелинейного отклика среды на действие накачивающего поля. Нелинейный отклик среды формируется за счёт откликов низкочастотных комбинационно-активных колебательно-вращательных молекулярных мод, а также отклика электронной гиперполяризуемости молекул [3–7]. Моделирование ОЭК показало [8], что данный спектроскопический метод вместе с двухимпульсным возбуждением среды может быть использован для селективного управления динамики внутримолекулярных колебаний. В данной работе представлены результаты экспериментальной реализации такого управления в чистых жидкостях хлороформа (CHCl_3) и нитробензола ($\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_2$).

Описание установки

Использованная в эксперименте установка изображена на рис. 1. Фемтосекундные импульсы генерировались стандартным Тi:сапфировым лазером производства фирмы Авеста, накачиваемым второй гармоникой Nd:YAG лазера с диодной накачкой. Выходная мощность лазера накачки – 3.9 Вт. Средняя энергия импульсов длительностью 35 фс составила $5 \cdot 10^{-9}$ Дж при длине волны несущей 790 нм. Излучение из лазера сразу поступает на призмный компенсатор дисперсии групповых скоростей

(ДГС). При изменении положения призм компенсатора ДГС фазовая модуляция фемтосекундных импульсов изменяется так, чтобы после прохождения оптической системы до образца импульсы были минимальной длительности. После компенсатора ДГС 30% мощности отводится в пробный луч. На поляризаторе пробный луч

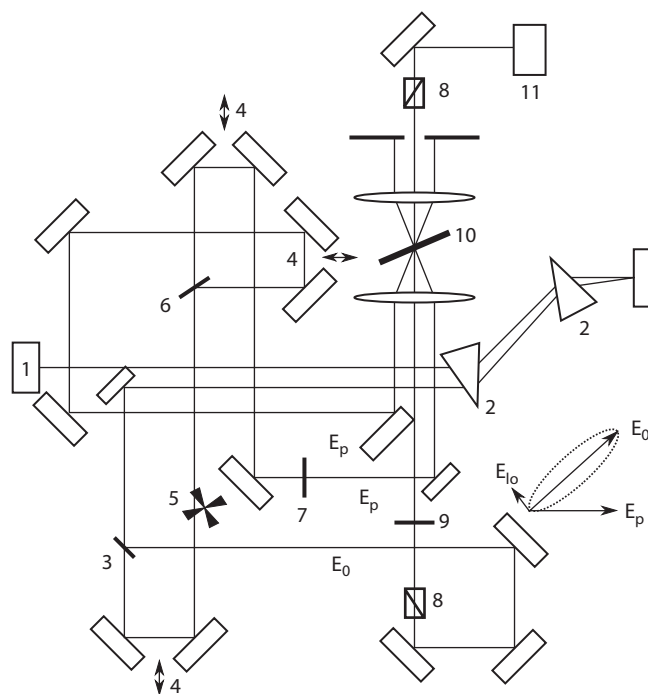


Рис. 1. Оптическая схема эксперимента: 1 – фемтосекундный Тi:сапфировый лазер; 2 – призмы компенсатора (ДГС); 3 – светоделитель, отражение 20%; 4 – линии задержки; 5 – механический модулятор; 6 – светоделитель, отражение 50%; 7 – пластинка $\lambda/2$; 8 – поляризатор, просветлённая призма Глана; 9 – пластинка $\lambda/4$; 10 – образец, кварцевая кювета толщиной 3 и шириной 20 мм; 11 – ФЭУ. Справа стрелками показаны направления линейной поляризации всех лучей, падающих на образец. Пунктиром показана эллиптическая поляризация излучения после пластинки $\lambda/4$.

теряет ещё примерно половину мощности. Оставшееся излучение поступает на механизированную линию задержки (шаг задержки 6.25 фс) между пробным лучом и лучами накачки, и механический модулятор синхронного детектирования. Линейная поляризация пробного излучения составляет 45° к линейной поляризации лучей накачки. После этого излучение поступает на светоделительную пластинку, где формируются два одинаковых по мощности луча накачки, каждый из которых имеет свою линию задержки для настройки разности оптических путей между импульсами накачки в эксперименте. Пробный луч и два луча накачки фокусируются в образце линзой с фокусным расстоянием 10 см. В результате, лучи накачки пересекаются в образце под углом около 2.5° к пробному лучу. Образец представляет из себя чистую, профильтрованную (размер пор 0.2 мкм) жидкость в кварцевой кювете толщиной 3 мм. Угол между нормалью кюветы и пробным лучом составляет порядка 10° , что позволяет избавиться от паразитных бликов. За образцом конфокально расположена ещё одна линза с фокусным расстоянием 10 см. Чтобы излучение накачки не мешало регистрации, за линзой стоит диафрагма, которая пропускает только пробный луч. За диафрагмой расположен анализатор и фотоэлектронный умножитель (ФЭУ), на расстоянии приблизительно 5 м от анализатора. Сигнал с ФЭУ поступает на полосовой фильтр, пропускающий частоты только близкие к частоте модуляции излучения накачки, а потом на усилитель и аналогово-цифровой преобразователь (АЦП). После АЦП цифровой сигнал подвергается синхронному детектированию.

Результаты

На рис. 2 представлены сигналы ОЭК нитробензола ($C_6H_5NO_2$) и хлороформа ($CHCl_3$), снятые при действии только одного импульса накачки. Следуя [6], выделим основные составляющие сигналов ОЭК на примере нитробензола и хлороформа. При нулевой задержке пробного импульса, сигнал ОЭК обусловлен “мгновенной” электронной гиперполяризуемостью и повторяет автокорреляционную функцию импульса накачки. На больших задержках сигнал формируется за счёт более медленных “инерционных” процессов. На задержках до 300 фс основной вклад в сигнал вносит анизотропия, связанная с либрационными движениями молекулы. Форма вращательного отклика ОЭК-сигнала в значительной мере обусловлена геометрией молекул. Нитробензол – большая плоская молекула, форма хлороформа близка к тетраэдрической. В связи с этим либрационный отклик вносит существенно больший вклад в сигнал ОЭК нитробензола, по сравнению с хлороформом. Вклад, обусловленный наведённой ориентацией молекул (ориентационный отклик), как правило, затухает за время порядка нескольких пикосекунд. Величина и время релаксации этого вклада связаны, соответственно, с формой молекулы и параметрами

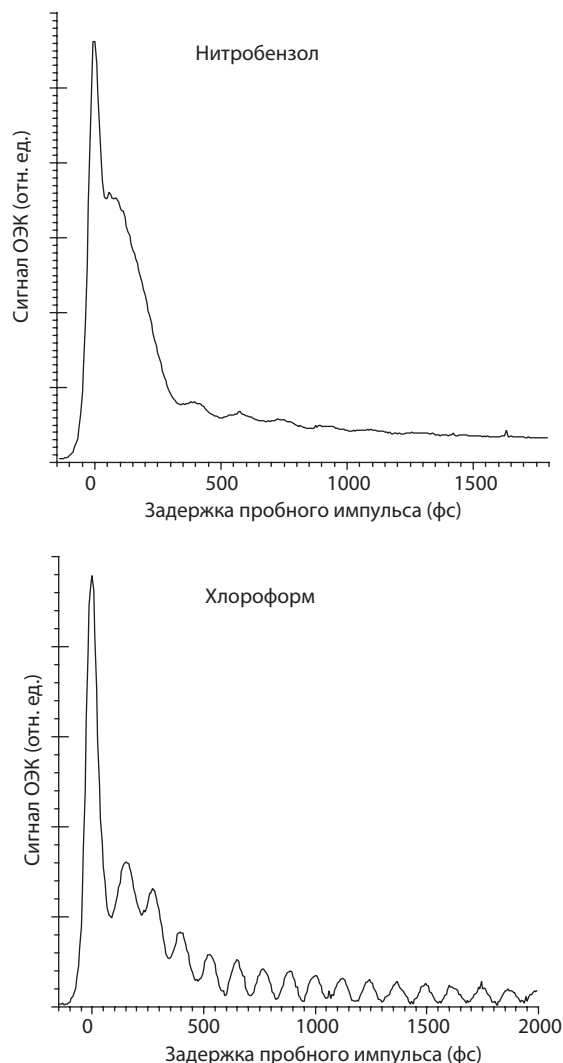


Рис 2. ОЭК-спектры нитробензола и хлороформа. Хорошо заметны основные вклады в сигнал: отклик электронной гиперполяризуемости, который повторяет форму автокорреляционной функции накачивающего импульса, отклик либрационных движений молекулы, отклик вращательной диффузии и отклик колебательной моды.

окружения (например, вязкостью). Помимо этих вкладов, сигнал ОЭК формируется за счёт внутримолекулярных колебательных мод. Эти вклады наблюдаются сразу после действия накачивающего импульса. В спектрах нитробензола вклад колебательной моды затухает при задержках более 1000 фс, тогда как в спектрах хлороформа вклад колебательной моды хорошо заметен и при задержке 1500 фс.

Для реализации лазерного контроля колебательной динамики молекул в жидкости мы действовали на среду вторым импульсом накачки, создавая конструктивную либо деструктивную интерференцию колебательных пакетов, добиваясь этим, соответственно, режимов усиления или подавления колебательных откликов в сигнале ОЭК. Одним из параметров выбора режима усиления или подавления является задержка между первым и вторым импульсами накачки (см. рис. 3). При

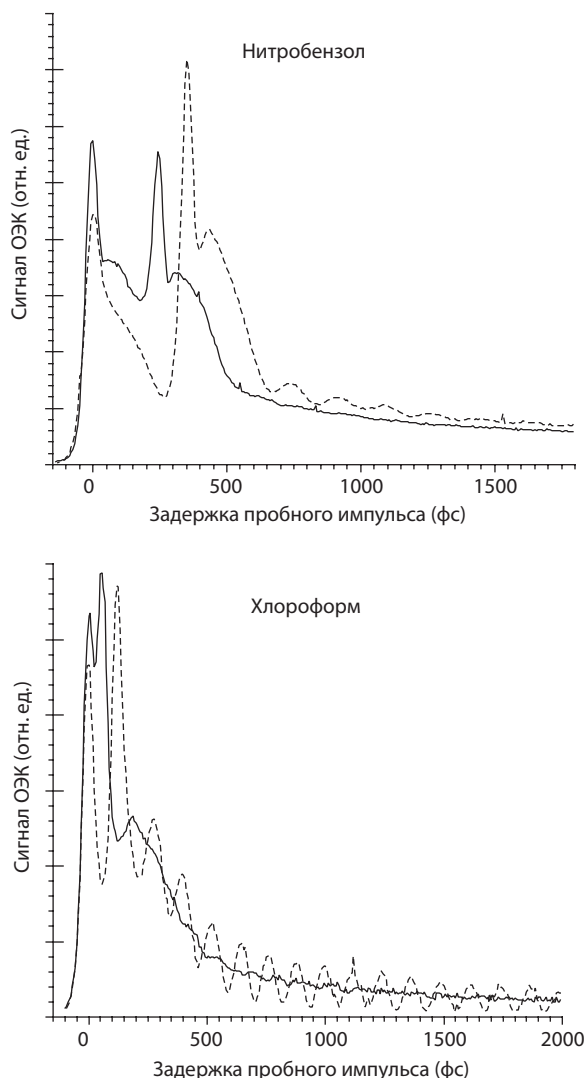


Рис. 3. Сигнал ОЭК при двухимпульсном возбуждении. Штриховая линия – усиление колебательной моды, задержка между импульсами накачки 100 фс для хлороформа и 350 фс для нитробензола. Сплошная линия – подавление колебательной моды, задержка между импульсами накачки 50 фс для хлороформа и 240 фс для нитробензола.

этом, помимо усиления или подавления колебательной моды, в результате действия второго импульса накачки усиливаются вклады, связанные с молекулярными вращениями (либрация и ориентационная анизотропия молекул). В работе [9] показано, что этими молекулярными движениями можно управлять, изменяя линейную поляризацию второго накачивающего импульса относительно первого. На больших задержках, в связи с затуханием колебательного отклика для режима подавления, требуется уменьшить мощность второго накачивающего импульса. Интенсивность второго импульса накачки на рис. 4 подобрана так, чтобы полностью подавить колебательную моду. В частности, это позволяет уже в сигнале ОЭК явно выделить либрационный и ориентационные отклики, что можно использовать как метод

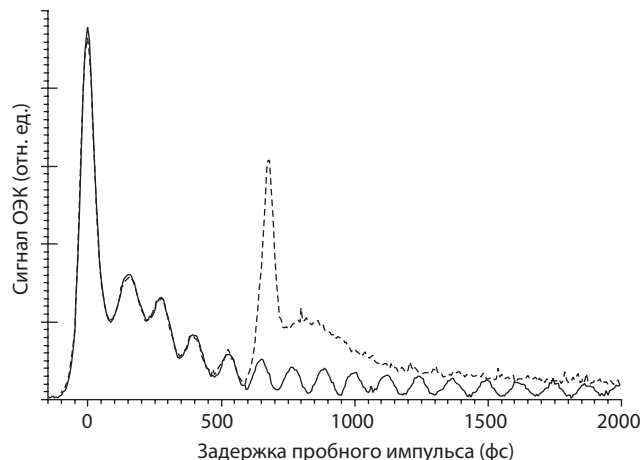


Рис. 4. Сигнал ОЭК при двухимпульсном возбуждении хлороформа. Сплошная линия – сигнал ОЭК от одной накачки. Штриховая линия – подавление колебательной моды (задержка между импульсами накачки 650 фс, относительная интенсивность второго накачивающего импульса в полтора раза меньше первого).

селективной спектроскопии колебательно-вращательной динамики молекул в жидкости.

Заключение

В настоящей работе мы впервые демонстрируем экспериментально фемтосекундный лазерный контроль колебательной динамики в молекулах, в жидкости, в субпикосекундном диапазоне. Эксперимент основывается на методах фемтосекундной поляризационной спектроскопии с пробными импульсами, в которой используется нерезонансное возбуждение среды лазерными импульсами. Состояние среды зондируется слабым пробным импульсом с регистрацией оптического эффекта Керра. Управление молекулярной динамикой осуществляется заданной последовательностью из двух импульсов накачки, где управляющими параметрами служат задержка между импульсами и их относительные интенсивности. Рисунок 3 показывает реализацию сценариев усиления и полного подавления внутримолекулярных осцилляций в чистых жидкостях хлороформа и нитробензола. Отметим, что, варьируя управляющие параметры, можно также реализовывать сценарии частичного усиления или подавления. Случай полного подавления внутримолекулярных осцилляций при минимально возможной задержке между импульсами накачки можно использовать для селективной поляризационной спектроскопии колебательно-вращательной динамики молекул в жидкости (например, для явного выделения в сигнале ОЭК вращательных откликов молекул). Предложенный метод позволяет манипулировать колебательной динамикой молекул и при больших задержках между импульсами накачки. Например, рис. 4 показывает реализацию именно такого сценария: первым

импульсом инициируются (включаются) когерентные осцилляции молекул, далее порядка 600 фс происходит их свободная эволюция, затем когерентные осцилляции подавляются (выключаются) вторым импульсом накачки. Отметим, что “включение” и “выключение” когерентной внутримолекулярной динамики молекул в субпикосекундном диапазоне может быть интересно как с точки зрения развития новых методов селективной спектроскопии, так и для реализации когерентного контроля фотофизических и фотохимических процессов в конденсированных средах.

Работа поддержана грантом Президента РФ “Ведущие научные школы” (НШ-4531.2008.2) и грантом РФФИ (№ 09-02-00136а).

Литература

1. Steinmeyer G.: J. Opt. A: Pure Appl. Opt. **5**, R1-R15 (2003)
2. Righini R.: Science **262**, no. 5138, 1386–1390 (1993)
3. Anderson D.T., Konigsmann F., Owschimikow N., Schwentner N.: Chem. Phys. Lett. **458**, no. 4-6, 303–307 (2008)
4. Yan Y.J., Mukamel S.: Phys. Rev. A **41**, 6485–6504 (1990)
5. Tanimura Y., Mukamel S.: Phys. Rev. E **47**, 118–136 (1993)
6. McMorow D., Lotshaw W.T., Kenney-Wallace G.A.: IEEE J. Quant. Electron. **24**, 443–454 (1988)
7. Steffen T., Forukas J.T., Duppen K.: J. Chem. Phys. **105**, no. 17, 7364–7382 (1996)
8. Моисеев С.А., Никифоров В.Г.: Квант. электроника **34**, 1077–1082 (2004)
9. Никифоров В.Г., Сафиуллин Г.М., Шмелёв А.Г., Леонтьев А.В., Лобков В.С.: Казанский физико-технический институт имени Е. К. Завойского 2007. Ежегодник, с. 29–31. Казань: ФизтехПресс 2008.

Изучение каталитических свойств наночастиц Ni методом атомно-силовой микроскопии и вольтамперометрии

С. А. Зиганшина, А. П. Чукланов, Д. В. Лебедев, Д. А. Бизяев, А. А. Бухараев

Отдел химической физики, лаборатория физики и химии поверхности

В работе с помощью атомно-силовой микроскопии изучена морфология поверхности высокоориентированного пиролитического графита с электроосаждёнными наночастицами никеля. Исследованы электрохимические и электрокаталитические свойства наночастиц никеля в отсутствии и присутствии этанола. Для построения гистограмм распределения наночастиц по размерам и площадям использовалась специальная компьютерная программа. На основании данных вольтамперометрии, атомно-силовой микроскопии и гистограмм распределения частиц по размерам проведена оценка каталитической активности единицы площади нанокатализатора в зависимости от условий его приготовления (концентрации электролита и времени осаждения).

Введение

В настоящее время исследования, посвящённые изучению свойств наноразмерных объектов, активно развиваются. Интерес к таким объектам, с одной стороны, стимулируется существенным прогрессом экспериментальных методов создания наноматериалов и способов их характеристики, с другой стороны – возможностью использования наноструктур в прикладных целях [1, 2]. Среди разрабатываемых наноматериалов большой интерес представляют наноразмерные частицы катализаторов, в частности, наночастицы металлов. Благодаря тому, что при переходе к наномасштабам частицы металлов приобретают специфические свойства, одним из которых является высокая каталитическая активность в различных реакциях [1, 2], перспективным считается использование их в прямых спиртовых топливных элементах [2, 3]. В настоящее время для этих целей достаточно широко применяются платина и платино-содержащие катализаторы [4]. Однако вследствие их дороговизны и небольшого распространения в земной коре необходимо создавать и исследовать катализаторы на основе 3d-металлов, например, никеля, электронная структура которых сходна с электронной структурой благородных металлов. Поэтому переходные металлы могут успешно заменить платину и палладий во многих химических и электрохимических реакциях [5, 6].

В большинстве экспериментальных работ катализаторы переходных металлов формируются с использованием электрохимического метода [4, 6]. Главное достоинство этого метода – относительная простота процесса формирования частиц металла. С помощью электрохимического осаждения при варьировании различных условий (например, состав раствора, время и потенциал осаждения) возможно получение частиц катализатора в широком интервале размеров. Кроме того, метод вольтамперометрии широко используется для исследования электрохимических свойств различных материалов, в частности, катализаторов [7].

Известно [8], что гетерогенные каталитические реакции протекают на поверхности катализатора, и каталитическая активность материала зависит от состояния его поверхности. Поэтому активность катализатора принято относить к единице поверхности [8]. Эта величина, называемая удельной каталитической активностью, определяется химическим составом, размером кристаллитов, а также морфологией поверхности катализатора. В последнее десятилетие метод атомно-силовой микроскопии (АСМ) хорошо зарекомендовал себя при изучении разного рода поверхностей [9]. Сопоставление каталитических свойств наночастиц металлов с морфологией их поверхности способствует разработке подходов к прогнозированию и оптимизации электрокаталитических и других свойств катализаторов.

Целью настоящей работы явилось изучение влияния геометрических параметров наночастиц никеля, сформированных на поверхности высокоориентированного пиролитического графита (ВОПГ), на их электрокаталитические свойства при окислении этанола, а также оценка каталитической активности единицы площади нанокатализатора в зависимости от условий его получения. Другими словами, необходимо было установить оптимальные размеры и плотность распределения наночастицы никеля на поверхности, позволяющие получить максимальную активность катализатора.

Экспериментальная часть

Формирование наночастиц никеля на поверхности ВОПГ с постоянной площадью (14 и 30 мм²) и изучение их электрохимических и электрокаталитических свойств проводили при помощи полярографа ЭКОТЕСТ-ВА (Россия). Была использована трёхэлектродная ячейка, включающая также в себя ВОПГ (рабочий электрод), хлоридсеребряный электрод сравнения и вспомогательный электрод (платиновая пластина). Электроосаждение наночастиц никеля

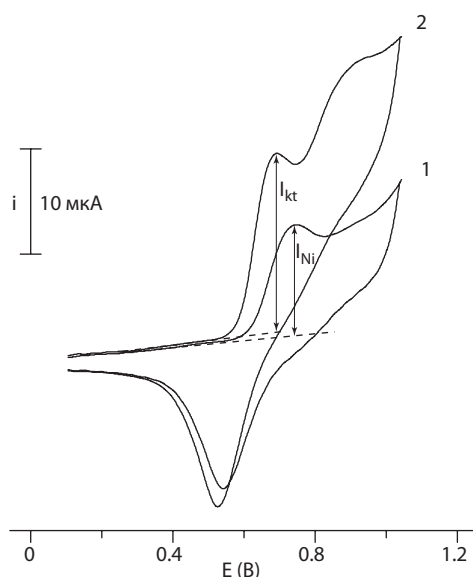


Рис. 1. Типичные циклические вольтамперограммы, полученные на ВОПГ с электроосаждёнными частицами никеля, в фоновом электролите с pH 10 в отсутствии (кривая 1) и присутствии (кривая 2) 0.025 М этанола.

на поверхности ВОПГ проводили потенциостатически при потенциале -1 В. Для получения серии электродов в зависимости от концентрации электролита осаждения формирование наночастиц никеля проводили из растворов, содержащих 0.0001 – 0.05 М сульфата никеля(II) (NiSO_4) и 0.4 М хлорида натрия (NaCl), в течение 10 с. Для получения серии электродов в зависимости от времени электроосаждения был использован 0.005 М раствор NiSO_4 в 0.4 М NaCl . Для удаления растворённого кислорода электролит предварительно продували аргоном в течение ~ 15 мин.

Электрохимические свойства ВОПГ с электроосаждёнными частицами никеля (ВОПГ-Ni) изучались в фоновом электролите (0.4 М NaCl + NaOH) с pH 10. pH-растворов контролировали с помощью pH-метра марки pH-150. Для изучения электрокаталитических свойств электроосаждённых наночастиц никеля использовался 0.025 М раствор этилового спирта в фоновом электролите с pH = 10. Скорость наложения

потенциала во всех электрохимических измерениях составляла 20 мВ/с.

Изучение морфологии поверхности наночастиц никеля, электроосаждённых на поверхности ВОПГ, проводили при помощи атомно-силового микроскопа марки Solver P47 в полуконтактном режиме с использованием зондов марки NSG11 (фирма НТ-МДТ, Россия).

Для определения размеров и площади поверхности частиц никеля, а также для построения гистограмм распределения частиц по размерам по полученным АСМ-изображениям и оценки удельной каталитической активности была использована разработанная нами ранее компьютерная программа [10]. Отличительная особенность этой программы – возможность построения гистограмм распределения наночастиц по размерам с учётом наличия на АСМ-изображении слипшихся частиц и неровностей подложки.

Результаты и обсуждение

На рис. 1 (кривая 1) представлена типичная циклическая вольтамперограмма, полученная в фоновом электролите на ВОПГ с электроосаждёнными частицами никеля. В области потенциалов от 0 до 1.1 В на вольтамперограмме наблюдается пара анодно-катодных пиков, которая, согласно [5, 6], соответствует электронному переносу $\text{NiO} \leftrightarrow \text{NiOOH}$. Следует отметить, что в данном случае электронный перенос является квазиобратимым (разность потенциалов между анодным и катодным пиками >60 мВ) [11]. При добавлении в раствор 0.025 М этилового спирта на анодной вольтамперограмме (рис. 1, кривая 2) наблюдается увеличение тока волны, соответствующей окислению Ni(II) до Ni(III) , а также появление дополнительной волны при потенциале ~ 0.9 В. Величины тока обеих волн зависят от концентрации этилового спирта в растворе. Считается, что на первой стадии при потенциале 0.5 – 0.6 В происходит формирование NiOOH . Окисление этанола протекает с участием NiOOH при потенциале ~ 0.9 В с образованием нового анодного пика с достаточно большим током и регенерацией NiO [12]. Таким образом, можно сделать вывод, что Ni(III) в форме NiOOH выступает катализатором при электроокислении

Таблица 1. Зависимость каталитического эффекта (Θ), среднего диаметра частиц никеля, площади поверхности частиц никеля на АСМ-изображении размером 5×5 мкм (S_{Ni}^a), удельного каталитического ($\hat{k}$) эффекта от концентрации раствора электроосаждения. Время электроосаждения частиц никеля составляло 10 с, образца составляла 14 мм².

Номер образца	Концентрация C (NiSO_4) (М)	Θ	Средний диаметр частиц (нм)	Ширина гистограммы на полувысоте	Плотность распределения частиц на 5 мкм ²	S_{Ni}^a (мкм ²)	$\hat{k}$ (мм ⁻²)
1	0.001	0.15 ± 0.01	105	57	1130	10.7	0.027
2	0.0025	0.25 ± 0.02	140	76	445	7.3	0.066
3	0.005	1.36 ± 0.01	99	55	1075	8.9	0.309
4	0.0075	0.74 ± 0.01	205	115	390	7.1	0.179
5	0.01	0.42 ± 0.01	175	78	220	10.8	0.079
6	0.025	0.74 ± 0.05	220	137	215	8.5	0.170
7	0.05	0.45 ± 0.02	140	102	490	8.6	0.087

этанола [6, 13]. Схему электрокатализа в этом случае можно представить следующим образом:



где P – продукты окисления этилового спирта. Наиболее вероятным продуктом окисления является уксусный альдегид или кислота [14].

На основании полученных вольтамперограмм (в отсутствии и присутствии этанола) был рассчитан каталитический эффект Θ по следующей формуле:

$$\Theta = (I_{kt} - I_{\text{Ni}}) / I_{\text{Ni}},$$

где I_{kt} – предельный ток окисления этанола на ВОПГ с наночастицами никеля, I_{Ni} – предельный ток окисления никеля в отсутствии этанола. Полученные данные приведены в таблице 1.

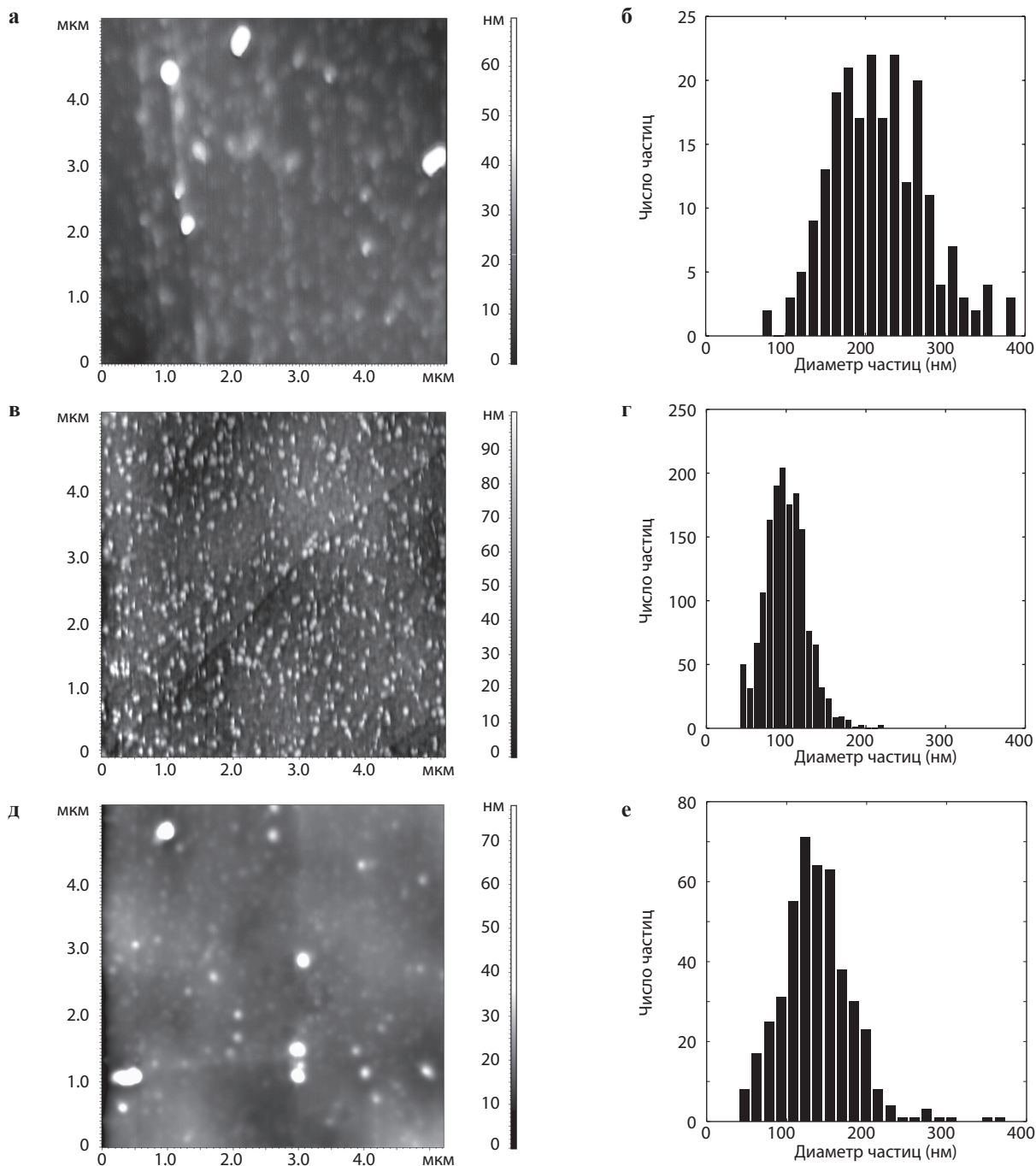


Рис. 2. АСМ-изображения и соответствующие гистограммы распределения по размерам частиц Ni, электрохимически осажённых на ВОПГ из раствора NiSO_4 с концентрацией 0.0025 М (а, б); 0.005 М (в, г); 0.025 М (д, е).

Поверхность образцов ВОПГ-Ni, сформированных при разной концентрации электролита, была исследована методом АСМ. В качестве примера на рис. 2 приведены АСМ-изображения наночастиц никеля, сформированных на поверхности ВОПГ из 0.0025 (а), 0.005 (в) и 0.025 М (д) раствора NiSO_4 . На основании полученных АСМ-изображений были построены гистограммы распределения наночастиц никеля по размерам (рис. 2б, г, е), определена площадь поверхности наночастиц никеля. Кроме того, с учётом определённой площади поверхности каталитически активных наночастиц никеля, их количества на поверхности и полной площади электрода была рассчитана электрокаталитическая активность единицы площади поверхности $\hat{k}$ (или удельный электрокаталитический эффект) по формуле:

$$\hat{k} = \Theta \cdot S^n / S_{\text{Ni}}^n S_{\text{tot}},$$

где S^n – площадь анализируемого АСМ-изображения размером 5×5 мкм; S_{Ni}^n – площадь поверхности частиц никеля на АСМ-изображении размером 5×5 мкм; S_{tot} – площадь поверхности электрода, на котором измерялся каталитический эффект Θ .

Зависимость значений удельных каталитических эффектов от концентрации раствора электроосаждения приведена на рис. 3а. В данном случае значения $\hat{k}$ соответствуют каталитической активности одного квадратного миллиметра поверхности Ni. На рис. 3б представлена зависимость гистограмм распределения наночастиц никеля по размерам от удельного каталитического эффекта и концентрации раствора электроосаждения. Из рис. 3 и таблицы 1 видно, что при относительно равных площадях активных частиц на поверхности наибольшей каталитической активностью обладают наночастицы никеля размером ~ 100 нм, сформированные из 0.005 М раствора NiSO_4 (образец № 3). Для этого образца характерно наиболее узкое распределение наночастиц никеля по размерам (рис. 3б). При сравнении образцов с одинаковой площадью поверхности частиц никеля (образцы № 3, 6, 7) максимальным удельным каталитическим эффектом обладает образец, на поверхности которого большое количество мелких частиц (образец № 3). Увеличение размеров наночастиц и уменьшение их количества в ~ 2 раза (образец № 7) ведёт к уменьшению каталитической активности

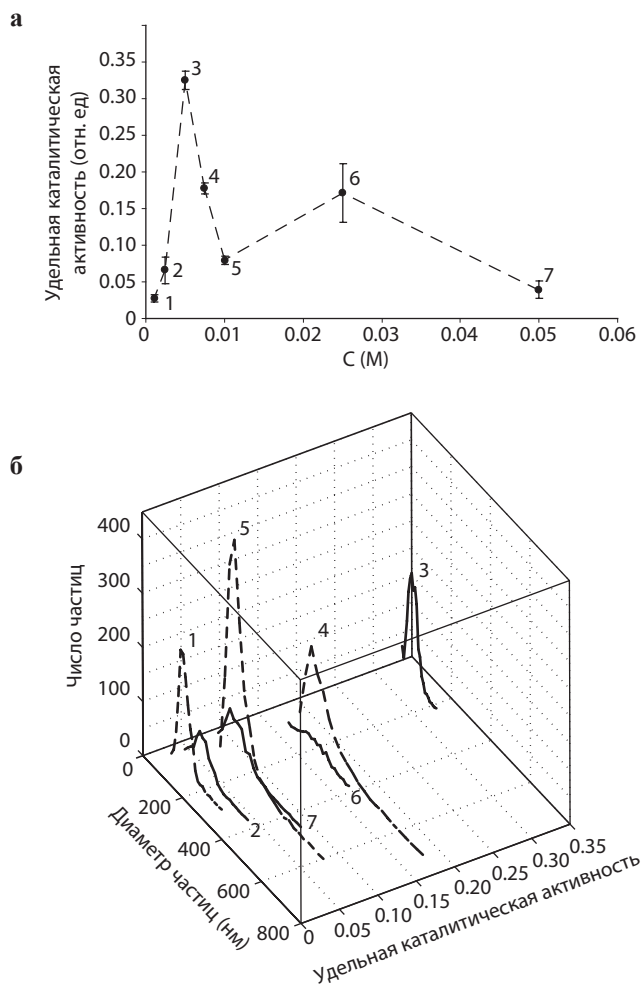


Рис. 3. Зависимость удельной (нормированная на 1 мм^2) каталитической активности частиц никеля (а) и гистограмм распределения частиц никеля по размерам (б) от концентрации раствора осаждения (время осаждения 10 с). Нумерация точек (а) и кривых (б) соответствует нумерации образцов в таблице 1.

в ~ 3.5 раза. Для образца № 6, на поверхности которого расположены частицы диаметром около 220 нм с плотностью распределения 215 частиц/ 5 мкм^2 , наблюдается промежуточное значение каталитической активности по сравнению с образцами № 3 и 7. Кроме того, следует отметить, что для образца № 1, несмотря на большое

Таблица 2. Зависимость каталитического эффекта (Θ), наиболее часто встречающегося диаметра частиц никеля, площади поверхности частиц никеля на АСМ-изображении размером 5×5 мкм (S_{Ni}^n), удельного каталитического эффекта ($\hat{k}$) от времени электроосаждения наночастиц никеля при потенциале -1 В из 0.005 М раствора NiSO_4 . Площадь образца составляла 30 мм^2 .

Номер образца	Время электроосаждения (с)	Θ	Средний диаметр частиц (нм)	Ширина гистограммы на полувысоте	Плотность распределения частиц на 5 мкм^2	S_{Ni}^n (мкм^2)	$\hat{k}$ (мм^{-2})
1а	5	1.0 ± 0.1	80	51	1080	11.2	0.086
2а	10	2.6 ± 0.3	90	46	1000	12.4	0.212
3а	15	1.5 ± 0.4	120	78	765	11.8	0.130
4а	20	1.0 ± 0.3	120	83	990	11.5	0.088
5а	25	1.2 ± 0.3	107	37	1160	11.7	0.122
6а	30	1.5 ± 0.3	105	50	1400	12.1	0.126

количество ($1130 \text{ частиц}/5 \text{ мкм}^2$) относительно небольших частиц (средним диаметром 105 нм) и развитую площадь поверхности частиц никеля (10.7 мкм^2), наблюдается наименьший удельный каталитический эффект. Возможно, это связано с тем, что доля малых частиц (до 100 нм) для образца № 1 равна 0.43 . Это означает, что гистограмма распределения частиц никеля смещена в сторону более крупных частиц. Из рис. 3б видно, что самой узкой гистограммой распределения частиц по размерам и макси-

мальной удельной каталитической активностью обладает образец № 3. Кроме того, доля малых частиц (до 100 нм) для этого образца составляет 0.52 , т.е. гистограмма распределения смещена в сторону малых диаметров частиц (рис. 2г, 3б). Для остальных образцов на гистограммах распределения (рис. 3б) наблюдается широкое “крыло” в области больших значений диаметров наночастиц никеля. Это означает, что на поверхности ВОПГ, наряду с мелкими частицами, присутствуют крупные конгломераты

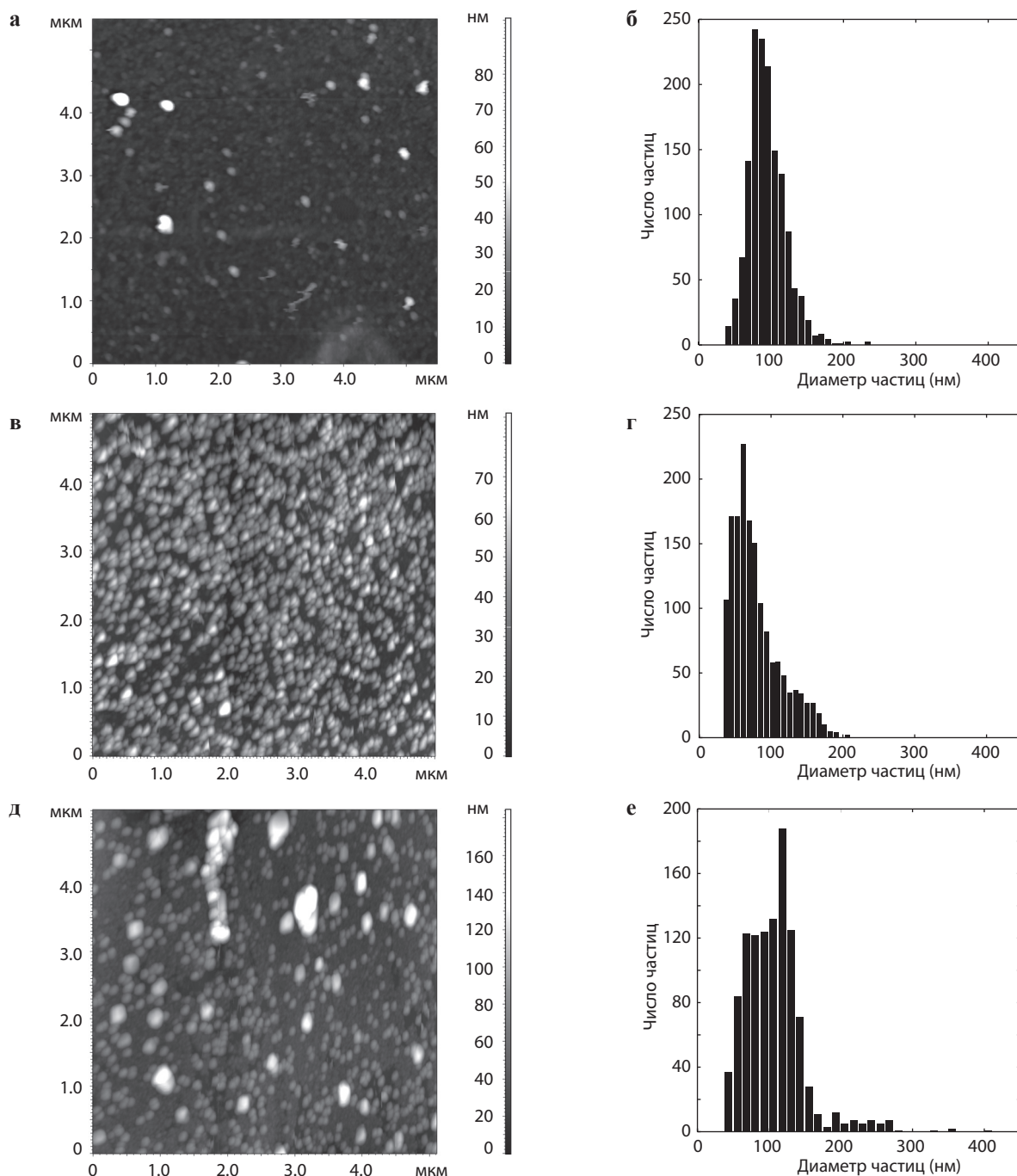


Рис. 4. АСМ-изображения и соответствующие гистограммы распределения по размерам частиц Ni, осаждённых в течение 5 с (а, б); 10 с (в, г) и 20 с (д, е).

размером до 500–700 нм, при этом значение доли малых частиц (до 100 нм) не превышает 0.43.

Таким образом, можно сделать вывод, что максимальной каталитической активностью в реакции электроокисления этанола обладают наночастицы никеля, электроосаждённые на поверхность ВОПГ, размером не более 100 нм, обладающие узкой гистограммой распределения.

Аналогичный вывод можно сделать из анализа АСМ-изображений наночастиц никеля, полученных при различном времени осаждения, и сопоставления этих данных с данными каталитического эффекта и удельного каталитического эффекта окисления этанола на ВОПГ с частицами никеля. В таблице 2 приведены данные зависимости каталитического эффекта (Θ), среднего диаметра частиц никеля, площади поверхности частиц никеля на АСМ-изображении (S_{Ni}^n) и удельного каталитического эффекта ($\hat{k}$) от времени электроосаждения наночастиц никеля при потенциале -1 В из 0.005 М раствора $NiSO_4$.

Из таблицы 2 и рис. 4а, б видно, что при малом времени осаждения (5 с, образец № 1а) на поверхности ВОПГ формируется большое количество мелких частиц размером ~ 80 нм. Однако гистограмма распределения наночастиц никеля (рис. 4б) смещена в сторону больших значений диаметра частиц, доля малых частиц (до 100 нм) на поверхности для этого образца равна 0.66. Вероятно, такая небольшая доля мелких частиц, по сравнению с крупными, обуславливает малый электрокаталитический эффект при окислении этанола. При увеличении времени осаждения до 10 с размеры и площадь поверхности формирующихся частиц незначительно увеличиваются (таблица 2). На АСМ-изображении (рис. 4в) наблюдается равномерно расположенные по поверхности ВОПГ наночастицы никеля. Причём более крупные частицы расположены поверх мелких. Доля мелких частиц на поверхности для образца № 2а составляет 0.78. Это означает, что гистограмма распределения наночастиц никеля для образца № 2а смещена в область малых диаметров. Таким образом, несмотря на меньший средний диаметр частиц никеля (80 нм) на поверхности образца № 1а, по сравнению со средним диаметром частиц никеля на поверхности образца № 2а (90 нм), большей каталитической активностью обладает образец № 2а (рис. 5а). Кроме того, для образца № 2а наблюдается максимальный каталитический эффект среди всей серии образцов.

При дальнейшем увеличении времени осаждения на АСМ-изображениях наблюдаются более крупные частицы, причём их формирование происходит вторым и третьим слоями. Для образцов 3а–6а (таблица 2, рис. 5б) характерны примерно одинаковые размеры и поверхностная площадь частиц никеля, однако плотность их распределения при увеличении времени осаждения увеличивается практически в 2 раза (от 765 до 1400 частиц/ 5 мкм^2). Следует отметить, что каталитические эффекты наночастиц никеля, сформированных при 15–30 с осаждения, заметно не отличаются. Однако при равных каталитических эффектах (образцы № 3а и 6а),

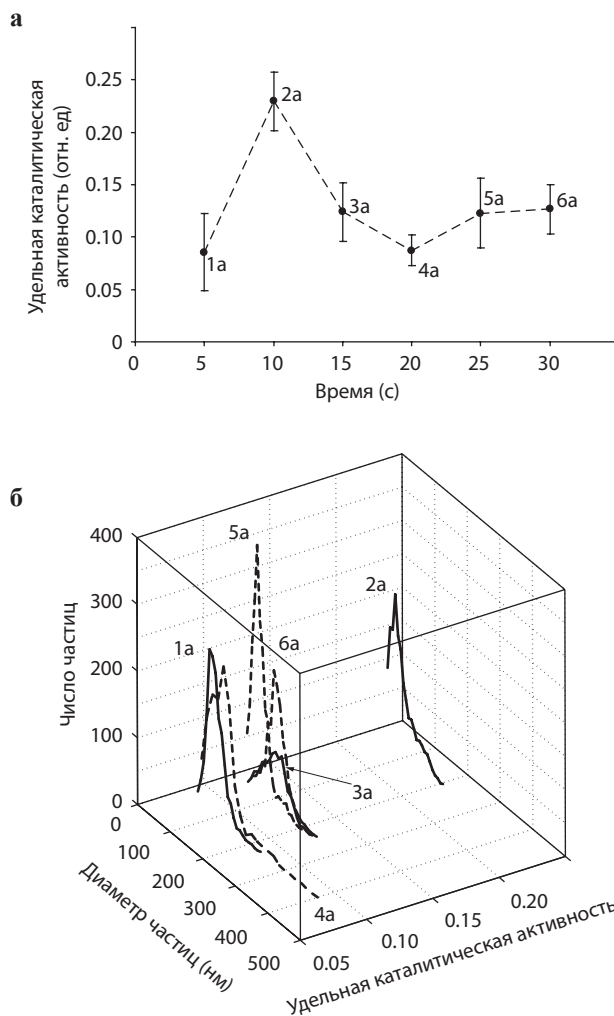


Рис. 5. Зависимость удельной (нормированной на 1 мм^2) каталитической активности наночастиц никеля (**а**) и гистограмм распределения частиц никеля по размерам (**б**) от времени осаждения частиц (концентрация раствора электроосаждения $C(NiSO_4) = 0.005$ М. Нумерация точек (**а**) и кривых (**б**) соответствует нумерации образцов в таблице 2.

их удельные каталитические эффекты уменьшаются с увеличением времени осаждения.

Таким образом, максимальный каталитический эффект окисления этанола наблюдается на наночастицах никеля, сформированных на ВОПГ, размером ~ 100 нм и с плотностью распределения 900–1000 частиц/ 5 мкм^2 . Такие частицы образуются при осаждении никеля в течение 10 с из 0.005 М раствора $NiSO_4$ в 0.4 М $NaCl$ при потенциале -1 В.

Выводы

В настоящей работе исследовано влияние геометрических параметров наночастиц никеля, сформированных на поверхности высокоориентированного пирографита, на их электрокаталитические свойства при окислении этанола, а также проведена оценка каталитической активности

единицы площади нанокатализатора в зависимости от условий его приготовления. Установлено, что максимальный удельный каталитический эффект (нормированный на 1 мм²) электроокисления этанола наблюдается на наночастицах никеля, сформированных на ВОПГ, размером ~100 нм и с плотностью распределения 900–1000 частиц/5 мкм², обладающих узкой гистограммой распределения и большой долей малых частиц (с размерами менее 100 нм).

Работа частично поддержана грантом РФФИ (№ 07-03-00860), грантом Президента РФ (МК-2763.2009.3) и Фондом содействия отечественной науке.

Литература

1. Сергеев Г.Б.: Нанохимия, с. 288. М.: Изд-во МГУ 2003.
2. Friedrich K.A., Geyzers K.P., Dickinson A.J., Stimming U.: J. Electroanal. Chem. **524-525**, 261–272 (2002)
3. Chu D., Jiang R.: Solid State Ionics **148**, 591–599 (2002)
4. Löffler M.-S., Natter H., Hempelmann R., Wippermann K.: Electrochimica Acta **48**, 3047–3051 (2003)
5. Berchmans S., Gomathi H., Prabhakara Rao G.: J. Electroanal. Chem. **394**, 267–270 (1995)
6. Golikand A.N., Asgari M., Maragheh M.G., Shahrokhian S.: J. Electroanal. Chem. **588**, 155–160 (2006)
7. Дамаскин Б.Б., Петрий О.А., Цирлина Г.А.: Электрохимия, с. 672. М.: Химия 2006.
8. Бухтияров В.И., Слинько М.Г.: Успехи химии **70**, 167–181 (2001)
9. Миронов В.Л.: Основы сканирующей зондовой микроскопии, с. 144. М.: Техносфера 2004.
10. Chuklanov A.P., Bukharaev A.A., Ziganshina S.A.: Surf. Interface Anal. **38**, 679–681 (2006)
11. Шольц Ф. (ред.): Электроаналитические методы. Теория и практика, с. 326. М.: Бином. Лаборатория знаний 2006.
12. Vilchez F., Gutierrez-Granados S., Alatorre Ordaz A., Galicia L., Herrasti P.: J. Electroanal. Chem. **614**, 8–14 (2008)
13. Jin G.-P., Ding Y.-F., Zheng P.-P.: J. Power Sources **166**, 80–86 (2007)
14. Kim J.-W., Park S.-M.: J. Korean Electrochem. Society **8**, no. 3, 117–124 (2005)

Углеродные нанотрубные автокатоды на никелевых ядрах

Е. Ф. Куковицкий, С. Г. Львов

Отдел химической физики, группа роста кристаллов

Разработана лабораторная технология получения углеродных нанотрубных автокатодов, позволяющая создавать до 14 опытных образцов за один процесс. Проведено математическое моделирование процесса осаждения углерода в реакторе Chemical Vapor Deposition на основе диффузионной модели, показывающее влияние различных факторов на профиль формируемого углеродно-нанотрубного слоя как активного элемента автокатодов. Оптимизация значений параметров процесса позволила достичь однородных распределений толщин получаемых нанотрубных слоёв по поверхности ядер.

Введение

Успехи в технологии источников электронов всегда оказывали сильное воздействие на создание и развитие самых разнообразных электронных устройств. На сегодняшний день наиболее используемыми источниками электронов являются термоионные катоды. В противоположность термоионной эмиссии, основанной на горячей нити, полевая эмиссия происходит при комнатной температуре из “холодного” катода под действием электрического поля. Уникальные геометрия и свойства углеродных нанотрубок (УН) сразу привлекли внимание к этим объектам, как к потенциальным полевым эмиттерам. УН имеют цилиндрическую форму и характеризуются высоким аспектным отношением (отношение длина/диаметр). Они обладают высокой электропроводностью при комнатной температуре. Атомы углерода, составляющие нанотрубку, связаны прочными ковалентными связями, в результате чего они не подвергаются электромиграции даже при 2000 К. В отличие от металлов электросопротивление УН уменьшается с температурой и поэтому они меньше нагреваются с ростом эмиссионного тока. Это предотвращает явление заострения одиночного эмиттера под действием поверхностной диффузии в условиях высокой температуры при наложенном электрическом поле. Эксперименты показали, что стабильность эмиссии сохраняется даже в условиях технического вакуума $\sim 10^{-6}$ мм.рт.ст. как результат высокой химической инертности нанотрубок. Всё это делает УН непревзойдённым на сегодняшний день материалом для изготовления автокатодов различных устройств вакуумной эмиссионной электроники, а разработку эффективных методов получения УН-плёнок и слоёв на проводящих подложках – важной практической задачей. Широкое распространение получил метод Chemical Vapor Deposition (CVD) благодаря возможности выращивания УН различной морфологии на поверхности подложек из самых разных материалов. Реализуется такая возможность, как правило, с помощью нанесения на поверхность подложки тонкой плёнки или монослоя наноразмерных частиц металла каталитически активного в реакциях разложения

углеводородов с выделением элементарного углерода при высоких температурах (500–1000 °C). Чаще всего в качестве металла-катализатора используются Ni, Fe, Co и их сплавы. Экспериментальные исследования показали, что УН, выращенные непосредственно на поверхности массивных каталитически активных металлов (МКАМ), значительно прочнее связаны с основой, чем нанотрубные слои, полученные на подложках с нанесённым катализатором в виде тонких плёнок [1]. К главным преимуществам использования МКАМ в качестве основы следует отнести: 1) устраняется трудоёмкая процедура нанесения катализатора; 2) в силу особенностей механизма роста УН на поверхности металла достигается прочная связь нанотрубного слоя с основой; 3) как показал эксперимент, при выращивании на массивном металле реализуется рост нанотрубок от основания, а значит – свободные концы трубок не имеют каталитических частиц, что значительно улучшает эмиссионные характеристики; 4) использование металла автоматически обеспечивает высокую электропроводность, необходимую для работы автокатада; 5) имеется широкий спектр методов модификации металлической поверхности, что может быть использовано для контроля каталитической активности поверхности металла и морфологии УН; 6) использование пластических свойств металлов позволяет легко придавать необходимую форму автокатадам и обеспечить хорошую совместимость с современными технологиями вакуумной электроники (например, ядра для термоэмиссионных катодов вакуумных электронных приборов в большинстве случаев изготавливают из никеля).

Получение УН-автокатодов

При разработке лабораторной технологии производства УН-автокатодов в настоящей работе был использован процесс CVD, описанный в [2] и адаптированный для получения небольших партий автокатодов на никелевых ядрах. Был применён кварцевый вертикальный CVD-реактор закрытого типа с горячими стенками. В качестве

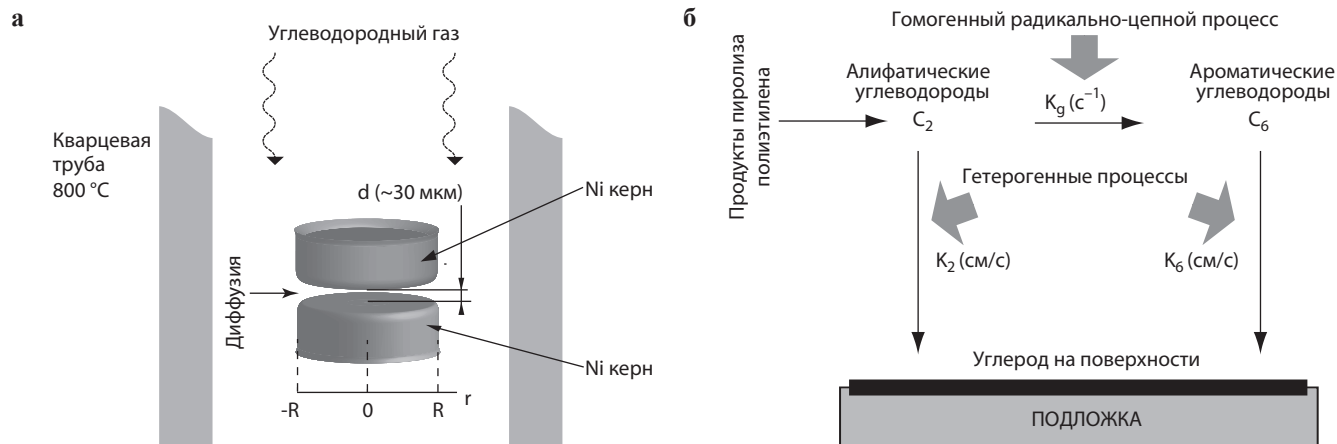


Рис. 1. а Схема размещения кернов в объёме CVD-реактора; б схема реакций в щели между кернами.

углеродсодержащего прекурсора служил полиэтилен. Никелевые керны представляли собой цилиндрические чашки с плоским дном диаметром 5 мм и высотой 2.5 мм. Для создания одинаковых условий роста УН на всех кернах существенным требованием для небольшого лабораторного реактора является минимизация объёма, занимаемого партией кернов в CVD-реакторе. С этой целью керны укладывались друг на друга таким образом, что закрытые плоские торцы образовывали узкую щель шириной ~30 мкм вследствие несовершенной плоскостности торцов (рис. 1а).

При такой конфигурации партия из 14 кернов, например, занимает объём менее 2–3 см³ и все керны находятся практически в одинаковых температурных и гидродинамических условиях. Кроме того, сложное конвективное движение газовой атмосферы в объёме реактора мало влияет на диффузионный транспорт реактивных газов в узком зазоре между торцами кернов. Идентичность условий газового транспорта и нагрева обеспечивает получение на торцах УН-слоёв с одинаковыми морфологическими свойствами и, как следствие, с одинаковыми автоэмиссионными характеристиками.

Обсуждение

Основные процессы, протекающие в CVD-реакторе

При реализации конкретного варианта метода термического CVD, а также прогнозирования профилей осаждения углерода на каталитически активных металлических поверхностях приходится рассматривать следующие основополагающие процессы, протекающие в CVD-реакторе:

1. Гомогенные реакции, имеющие место в газовой фазе. Основными реакциями являются реакции дегидрогенизации алифатических и ароматических соединений и реакции разрыва C–C связей. Эти реакции термического пиролиза углеводородов протекают по неразветвлённому радикально-цепному механизму, состоящему из трёх

стадий: инициирования радикалов (цепи), продолжения цепи и обрыва цепи [3]. Последовательность реакций состоит в превращении неароматических соединений в ароматические и зависит от резидентного времени молекул углеводорода в горячей зоне реактора.

2. Процессы транспорта в газовой атмосфере, включающие газовые потоки в реакторе и диффузию активных компонентов через граничный слой, прилегающий к подложке. Характер газовых потоков определяется геометрией реактора и, в частности, конфигурацией каталитически активных поверхностей, на которых происходит осаждение углерода. Подходящим выбором размещения металлических подложек, например, определяются условия транспорта реактивных газовых компонентов вблизи поверхности и, как следствие, особенности протекания гомогенных и гетерогенных реакций [4].

3. Гетерогенные поверхностные реакции. Эти реакции задают скорость осаждения каталитического углерода. Для реалистического описания кинетики осаждения необходимо рассматривать не только диффузию через граничный слой, но и отдельные процессы на поверхности подложки – адсорбцию, поверхностную диффузию, конкретные поверхностные реакции, десорбцию. Важное значение имеет природа активных центров на поверхности, поскольку они инициируют образование углеводородных радикалов. Образующиеся на поверхности катализатора радикалы могут играть двоякую роль в CVD-процессе для выращивания УН. Часть радикалов может переноситься в газовую фазу и участвовать в гомогенных реакциях пиролиза углеводородов, инициируя цепной процесс. Участие радикалов, генерируемых поверхностью, в каталитических реакциях, составляет основу концепции гетерогенно-гомогенных реакций, при которых каталитическое событие, инициированное на поверхности, продолжается в газовой фазе [3]. Другая часть радикалов, претерпев последовательность реакций дегидрогенизации, оставляет на поверхности элементарный углерод. Виды радикалов и их относительная концентрация на поверхности зависят от

исходных углеводородов, природы активных центров и, как показывает эксперимент, от условий газового транспорта вблизи поверхности катализатора [4]. Использование МКМ-подложек предоставляет широкие экспериментальные возможности контроля природы активных центров и их поверхностной плотности, для реализации которых могут быть применены различные методы поверхностной обработки.

4. Взаимодействие элементарного углерода с металлической подложкой. Переходные металлы (Fe, Ni, Co) при достаточно высоких температурах и высокой термодинамической активности углерода в газовой фазе могут растворять несколько процентов углерода в твёрдом состоянии. Такое растворение осаждённого углерода начинается уже при температуре 300–400 °С. В условиях процесса CVD (800–1000 °С) растворение до состояния пересыщения или химическое взаимодействие углерода с металлом могут привести к фрагментации поверхностных слоёв металла с образованием нанокompозита из графитоподобного углерода и наноразмерных металлических частиц. Процесс имеет критически важное значение для роста УН на поверхности МКМ. Сплавы на основе никеля распадаются непосредственно через процесс графитизации без образования карбидов. В результате образуются наночастицы металла 10–100 нм, которые инициируют рост УН и нанотрубок.

Модель

Диффузионное движение газов в узкой щели с одновременным протеканием химических реакций в первом приближении может быть представлено схемой на рис. 1б и следующей системой дифференциальных уравнений, записанных для случая цилиндрической симметрии с соответствующими граничными условиями:

$$D_2 \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dC_2}{dr} \right) - \left(K_g + \frac{S}{V} K_2 \right) C_2 = 0,$$

$$C_2 = C_{20}, C_6 = 0, \text{ при } r = R;$$

$$D_6 \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dC_6}{dr} \right) - K_6 \frac{S}{V} C_6 + K_g C_2 = 0,$$

$$\frac{dC_2}{dr} = \frac{dC_6}{dr} = 0, \text{ при } r = 0.$$

Здесь C_2 и C_6 – концентрации исходного углеводорода и интермедиата, соответственно. Скорость осаждения углерода определяется как $W = K_2 C_2 + K_6 C_6$.

В соответствии с имеющимися литературными данными по пиролизу полиэтилена [5] предполагалось, что исходным реактивным компонентом являются алифатические углеводороды C_2 , претерпевающие в условиях длительного резидентного времени превращение в ароматические соединения C_6 в результате гомогенного

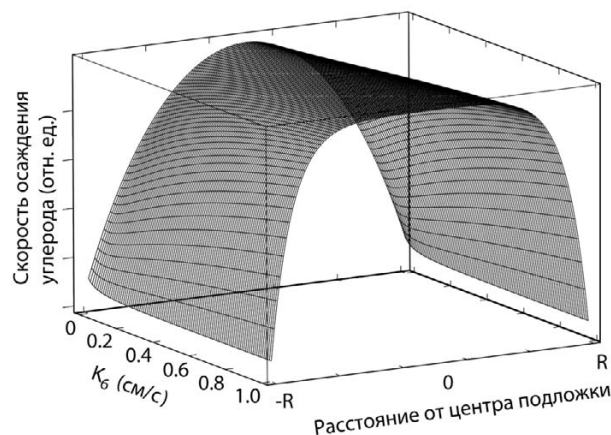


Рис. 2. Пример расчёта нормированного профиля скорости осаждения углерода $W(r, K_6)$ при $K_2 = 0.0001 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$, $K_g = 1 \text{ с}^{-1}$.

радикально-цепного процесса, который феноменологически описывается константой скорости K_g . Оба реактивных компонента, C_2 и C_6 , могут непосредственно выделять на торцовых поверхностях кернов элементарный углерод в результате гетерогенных реакций с константами K_2 и K_6 . Коэффициент диффузии реактивных компонентов $D_2 = D_6 = D$ при давлении газовой атмосферы ~ 1 атм принимался равным $\sim 0.1 \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$. Величина $S/V = 2/d$ – гетерогенный фактор, d – расстояние между кернами, R – радиус кернов. Моделирование в широкой области параметров K_g , K_2 и K_6 позволило получить профили осаждения углерода на торцовой поверхности кернов, в том числе аналогичные наблюдаемым в эксперименте. На рис. 2 приведён пример расчётной зависимости радиального распределения углерода. Видно, что изменение параметров приводит от сильно неоднородного (в данном случае область малых K_6) к значительно более однородному профилю осаждения углерода. Поскольку состав газовой атмосферы, полученный в результате пиролиза полиэтилена, неизвестен,



Рис. 3. Полученные углеродные нанотрубные автокатализаторы на никелевых ядрах.

условия равномерного роста УН могли быть найдены только экспериментально. Это достигалось поиском метода обработки торцовых поверхностей кернов, который обеспечивал подходящие значения констант скоростей гетерогенных реакций K_2 и K_6 . Для кернов сравнительно небольшого диаметра (5 мм) хорошие результаты, т.е. близкое к однородному формирование УН-слоя, были получены с помощью механической полировки торцов тонкой (1 мкм) алмазной пастой.

УН-автокатоде, полученные в реализованном CVD-процессе, показаны на рис. 3. Эмиссионные характеристики подобных автоэммиттеров на плоских подложках изучались в работе [6].

Литература

1. Kukovitsky E.F., Lvov S.G., Sainov N.A., Shustov V.A.: Appl. Surf. Sci. **215**, 201–208 (2003)
2. Kukovitsky E.F., Chernozatonskii L.A., Lvov S.G., Melnik N.N.: Chem. Phys. Lett. **266**, 323–328 (1997)
3. Васильева Н.А., Панфилов В.Н.: Кинетика и катализ **43**, 189–194 (2002)
4. Lee W.J., Li C.-Z.: Carbon **46**, 1208–1217 (2008)
5. Conesa J.A., Font R., Marcilla A., Garcia A.N.: Energy & Fuels **8**, 1238–1246 (1994)
6. Musatov A.L., Kiselev N.A., Zakharov D.N., Kukovitsky E.F., Zhdanov A.I., Izrael'yants K.R., Chirkova E.G.: Appl. Surf. Sci. **183**, 111–119 (2001)

Взаимодействие плазмон-поляритонных волн с нанощелями и нанопроволоками на тонкой плёнке золота

А. Л. Степанов, Е. В. Нуждин, Ю. Н. Осин

Отдел радиационных воздействий на материалы, лаборатория радиационной физики

Представлены результаты экспериментальной реализации двумерных оптических элементов – плазмонных рассеивателей и зеркал Брегга, состоящих из нанощелей или нанопроволок на тонкой плёнке золота, сформированных с целью управления распространением плазмон-поляритонных волн на металлической поверхности. Рассеиватели были изготовлены методом фокусированного ионного луча, а зеркала Брегга – при помощи электронно-лучевой литографии. Геометрические параметры наноструктур контролировались при их изготовлении с помощью сканирующей электронной микроскопии. Плазмонное ближнее поле распределения интенсивности по поверхности металлической плёнки было зарегистрировано при измерении плазмонных радиационных потерь в дальнем оптическом поле.

Введение

Наноплазмоника – это составляющая часть нанооптики, то есть оптики нанометровых масштабов. В частности, предметом наноплазмоники является оптика поверхностных электромагнитных волн, обусловленных колебаниями электронов проводимости относительно кристаллической решётки, т.е. волн, распространяющихся по металлическим поверхностям или границам раздела сред с металлом [1]. Такие волны называются плазмон-поляритонными волнами (ППВ) [2]. Уникальность ППВ обусловлена высокой пространственной локализацией вдоль тонкой границы раздела сред и, как следствие, возможностью гигантского усиления напряжённости электромагнитного поля на ней.

Настоящая работа посвящена исследованию особенностей распространения ППВ по поверхности тонкой плёнки золота, содержащей топографические наноструктуры в виде нанощелей и нанопроволок. Интерес к подобным объектам обусловлен тем, что их применение позволяет конструировать миниатюрные оптические плазмонные устройства, в которых удаётся преодолеть фундаментальное дифракционное ограничение по релеевскому рассеянию света при его взаимодействии с малыми объектами [3].

Постоянная распространения ППВ k_s отличается от волнового числа света $k_0 = \omega/c_0$ (ω – частота, c_0 – скорость света в вакууме), и с учётом диэлектрических проницаемостей двух сред ϵ_1 и ϵ_2 , на границе которой существует ППВ, зависит от ω через дисперсионное соотношение [4]:

$$k_s = k_0 \sqrt{\frac{\epsilon_1 \epsilon_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2}}. \quad (1)$$

ППВ могут распространяться только вдоль границ раздела сред с диэлектрическими проницаемостями

разных знаков. Если в одной среде $\epsilon_1 > 0$, то должны выполняться условия $\epsilon_2 < 0$ и $|\epsilon_2| > \epsilon_1$. В оптике чаще всего имеют дело с ППВ на границе среды с воздухом ($\epsilon_1 = 1$), и условия существования ППВ выполняются для сред с высокой концентрацией свободных носителей, у которых область аномальной дисперсии охватывает ИК- и видимый диапазон частот, что характерно для благородных металлов. На рис. 1 приведена типичная дисперсионная зависимость $\omega = f(k_s)$ для ППВ на границе металл-вакуум (кривая 1), соответствующая уравнению (1), которая стремится к величине $\omega_p(1 + \epsilon_1)^{-1/2}$, где ω_p – плазменная частота электронов в металле. Из рисунка видно, что отклонение кривой 1 от фоновой линии в вакууме (линия 2) растёт с частотой, причём фазовая и групповая скорости данной волны уменьшаются [5]. Кривая 3 соответствует $\omega(k_s)$ световой волны в матрице стекла и она пересекается с кривой 1 на частоте, при которой происходит фазовое согласование обеих волн, что на практике используется для преобразования света в ППВ и обратно.

В настоящем исследовании для регистрации распределения интенсивности ближнего поля ППВ по поверхности металлической плёнки используется недавно предложенная

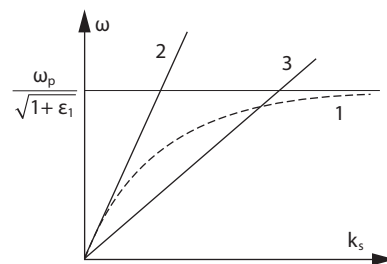


Рис. 1. Закон дисперсии плазмонных колебаний в системе металл-вакуум по модели Друде. Дисперсионная кривая ППВ на границе раздела металл-вакуум (1), фоновая линия в вакууме (2) и стекле (3).

методика измерения плазмонных радиационных потерь (РП) в дальнем оптическом поле [6]. При помощи этой методики впервые был проведён количественный анализ взаимодействия ППВ с наноструктурами – с цепочками наночастиц на поверхности плёнки серебра [6–8]. В данной работе приводятся новые экспериментальные результаты по созданию двумерных оптических элементов – плазмонных рассеивателей и зеркал Брегга, состоящих из нанощелей или нанопроволок на тонкой плёнке золота, сформированных с целью управления распространением ППВ на металлической поверхности.

Методика эксперимента

Исследуемые в настоящей работе наноструктуры при их изготовлении контролировались с помощью сканирующей электронной микроскопии, на микроскопе фирмы Zeiss EVO 50 XVP. В качестве среды для распространения ППВ были использованы тонкие плёнки золота толщиной ~ 70 нм с поверхностными наноструктурами – нанощелями (рис. 2 и 3), сформированными с помощью фокусированного луча ионов Ga^+ по методике, приведённой в работе [9], а также нанопроволоками золота (рис. 4 и 5), полученными комбинацией методов электронно-лучевой литографии и электронно-лучевого распыления, подобно ранее изученным серебряным наноструктурам [10]. Для возбуждения ППВ на поверхности плёнки была также сформирована одиночная щель или нанопроволка (рис. 3 и 5). Ширина нанощелей составляла 200–300 нм, а её глубина была равна толщине плёнки золота. Диаметр нанопроволок был выбран порядка 300 нм. Возбуждённая плазмонная волна, распространяясь по поверхности, взаимодействует с решётками из нанощелей и нанопроволок, расположенными под различными углами φ по отношению к направлению распространения волны.

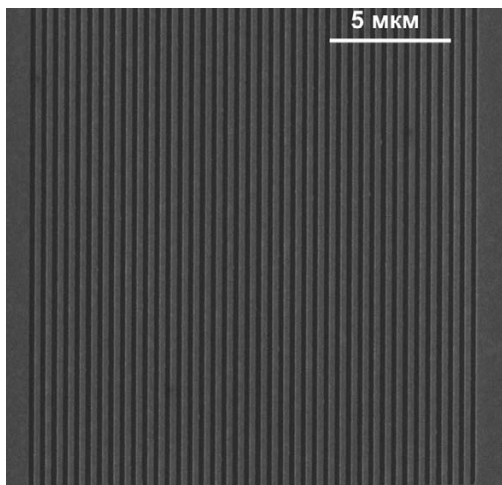


Рис. 2. Изображение фрагмента поверхности тонкой плёнки золота, содержащей решётку из нанощелей, полученное на сканирующем электронном микроскопе.

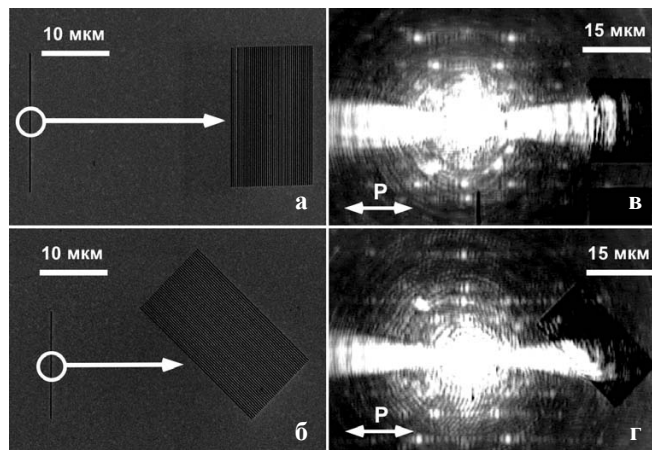


Рис. 3. Изображения топологических поверхностных структур образцов, содержащих решётки нанощелей, расположенных под разными углами по отношению к отдельной нанощели, полученные на сканирующем электронном микроскопе (а, б). Кружками обозначены места на поверхности образцов, облучаемые лазерным лучем, и являющиеся источниками возбуждения ППВ. Стрелками показаны направления распространения ППВ. Соответствующие оптические изображения распределения интенсивностей ППВ по площади образца (в, г).

Оптическая методика, используемая в работе и позволяющая регистрировать изображение поверхностного распределения ближнего поля ППВ посредством измерения в дальнем электромагнитном поле интенсивности РП, подробно описана в работах [6, 11]. ППВ возбуждались на одиночных нанощелях и нанопроволоках излучением Ti:Sapphire лазера на длине волны 800 нм. Сфокусированный луч лазера падал нормально на поверхностные одиночные наноструктуры образца, как схематично показано кружком на электронно-микроскопических снимках (рис. 3 и 5). При этом поляризация лазерного луча была выбрана перпендикулярно одиночной нанощели и нанопроволоки. Изображения распределения интенсивности

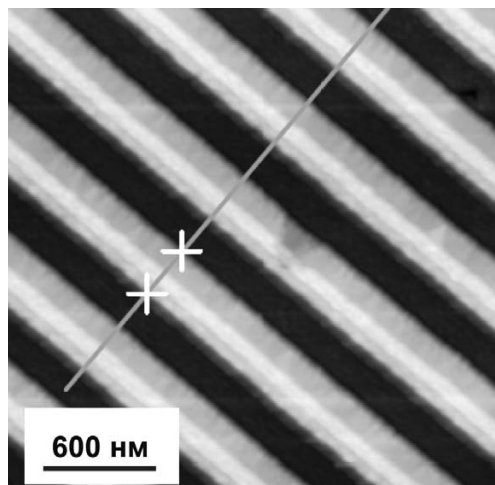


Рис. 4. Изображение фрагмента поверхности тонкой плёнки золота с расположенной на ней решёткой из нанопроволок, полученное на сканирующем электронном микроскопе.

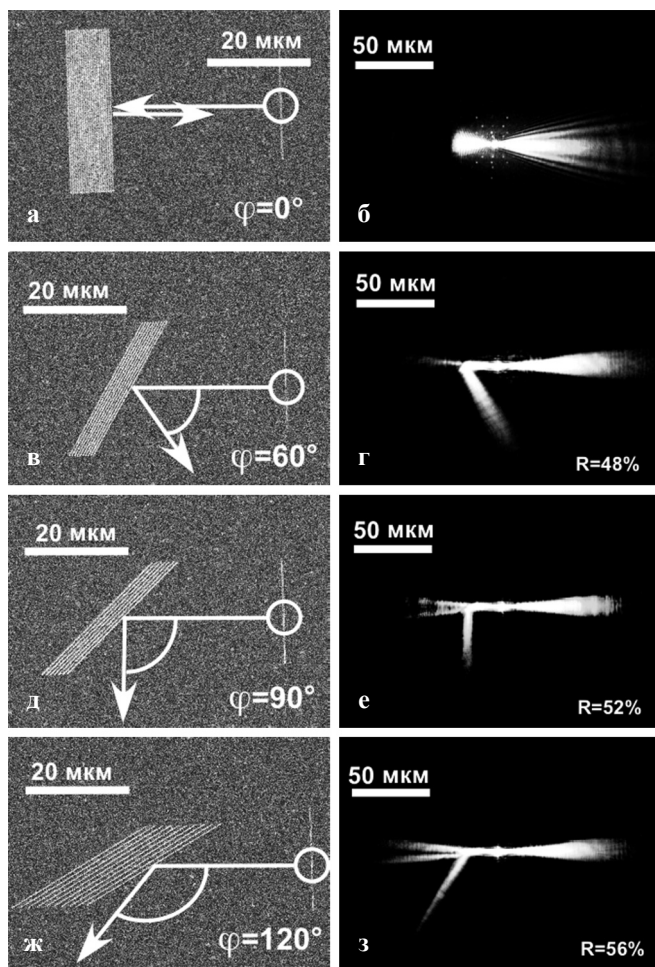


Рис. 5. Изображения топологических поверхностных структур образцов, содержащих решётки нанопроволок, расположенных под разными углами по отношению к отдельной нанопроволоке, полученные на сканирующем электронном микроскопе (а, в, д, ж). Кругами обозначены места на поверхности образцов, облучаемые лазерным лучем, и являющиеся источниками возбуждения ППВ. Стрелками показаны направления распространения ППВ. Соответствующие оптические изображения распределения интенсивностей ППВ по площади образца (б, г, е, з).

РП по площади образца (рис. 3 и 5) были получены с помощью цифровой ПЗС-камеры (прибор с зарядовой связью). Регистрируемые камерой изображения являются проекциями ППВ на анализируемой поверхности и в каждой своей точке пропорциональны интенсивности ППВ, что позволяет количественно оценить интенсивность ППВ на каждом участке поверхности образца [6, 11].

Результаты и обсуждение

Чаще всего на практике для возбуждения ППВ оптического диапазона применяют призмы нарушенного полного отражения, дифракционные решётки или краевые диафрагмы [1]. В настоящей работе для этой цели используются дифракционные эффекты. Одиночные наноструктуры (наношель и нанопроволока) при их лазерном облучении рассеивают свет в пространстве под разными углами.

Когда при некоторых углах падения рассеянного света дифрагированная волна оказывается направленной вдоль поверхности металлической плёнки, она представляет собой ППВ [5]. При этом происходит выполнение закона сохранения импульса (иначе – условие фазового синхронизма) при преобразовании света в поверхностные поляритоны без изменения частоты. Типичная длина пробега ППВ вблизи длины волны 800 нм для благородных металлов (золото, серебро) составляет величину порядка 20–50 мкм [3]. Интенсивности распределения по поверхности таких ППВ, возбуждённых на одиночных наноструктурах (наношель и нанопроволока) и распространяющихся в перпендикулярном направлении от них, отчётливо видны на рис. 3 и 5. На этих же рисунках показано взаимодействие таких возбуждённых ППВ с топографическими поверхностными структурами в виде решёток наношелей или нанопроволок.

Рассмотрим первоначально взаимодействие ППВ с плазмонным рассеивателем – дифракционной решёткой, сформированной набором наношелей. Интерес к данной задаче обусловлен использованием на практике гетеродинного ППВ-интерферометра, позволяющего с высокой точностью определять фазовую скорость ППВ [12]. Составным элементом интерферометра является плазмонная поверхностная дифракционная решётка, служащая для преобразования ППВ в объёмное излучение – рассеянный свет, который регистрируется фотодетекторами.

Для эффективной работы плазмонного рассеивателя требуется, чтобы падающая на решётку ППВ не проходила через неё и не отражалась, а максимально затухала внутри структуры и рассеивала свет. Экспериментальным подбором расстояния между наношелями и их шириной в дифракционных решётках при их изготовлении получены структуры, отвечающие перечисленным требованиям. Как видно на изображении распределения интенсивности РП (рис. 3в, г), возбуждённая на одиночной щели ППВ взаимодействует с решёткой, состоящей из набора наношелей, и полностью затухает после прохождения порядка 20 периодов решётки при нормальном падении на неё и после преодоления около 40 периодов при падении под углом 45°. Поскольку при оптической регистрации РП на ПЗС-камеру может попадать и рассеянный на образце свет, то появление круглого пятна на стадии затухания ППВ отражает преобразование плазмонной волны в свет.

Рассмотрим другой пример экспериментального наблюдения взаимодействия ППВ с дифракционной решёткой, состоящей из нанопроволок (рис. 4 и 5). Данный набор нанопроволок был выбран таким образом, чтобы организовать решётку Брегга с максимумом интенсивности отражения на длине волны вблизи излучения лазера ~800 нм. На рис. 4 и 5а, в, д, ж приведены электронные микрофотографии, демонстрирующие структуру зеркала Брегга и одиночную нанопроволоку, на которой возбуждаются ППВ. На рис. 5б, г, е, з показано распределение интенсивности ППВ при взаимодействии с решётками Брегга, расположенными под разными углами падения волны. Видно, как в соответствии с законами

геометрической оптики, при падении ППВ на решётку Брегга, формируется отражённая волна в зависимости от угла падения ϕ . Интенсивности отражённой волны, определяемые по методике работы [6], также приведены на рис. 5 и, как видно из рисунка, составляют порядка 50% от интенсивности падающей волны. Заметим, что ППВ частично проникает сквозь дифракционную решётку. Особенности формирования стоячей интерференционной волны между решёткой и одиночной проволокой при нормальном падении ППВ на решётку Брегга (рис. 5б) подробно промоделировано и проанализировано в работе [13]. Как видим, подбирая экспериментально геометрические и топографические параметры дифракционной решётки из нанопроволок формируются эффективные плазмонные рефлекторы, интенсивностью отражения которых можно управлять выбором угла падения ППВ.

Заключение

Таким образом, в работе получены поверхностные структуры – дифракционные решётки, состоящие из набора нанощелей или нанопроволок на поверхности тонкой плёнки золота. Показана способность полученных наноструктур к эффективному рассеиванию плазмонной волны в свет, либо к высокому отражению и перенаправлению распространения ППВ на поверхности металлической плёнки. Данные экспериментальные методики оказываются эффективными при практическом конструировании и изготовлении поверхностных нанопотонных структур, используемых в качестве двумерных оптических элементов, таких как точечные источники возбуждения ППВ, зеркала Брегга, рассеиватели и делители ППВ, интерферометры, плазмонные волноводы и др.

Авторы благодарят Немецкий научный фонд им. Александра фон Гумбольдта и Австрийский научный фонд в рамках программы им. Лизы Майтнер за фи-

нансовую поддержку. Авторы выражают признательность Д. Р. Кренну (J. R. Krenn), Ф. Р. Ауссеггу (F. R. Aussenegg), Х. Дитлбахеру (H. Ditlbacher), А. Хохенау (A. Hohenau), А. Дрецету (A. Drezet), А. Лейтнеру (A. Leitner) (Университет Граца и Институт наномасштабных исследований им. Э. Шредингера, Австрия), Т. Эббесену (T. Ebbesen) (Университет Страсбурга, Франция), а также М. У. Гонзалезу (M. U. Gonzalez), Д.-С. Вееберу (J.-C. Weeber), Р. Куиданту (R. Quidant) и А. Деро (A. Dereux) (Университет Дижона, Франция) за помощь в проведении экспериментов и обсуждении результатов.

Литература

1. Климов В.В.: Наноплазмоника. М.: Физматлит 2009. 480 с.
2. Агранович В.М., Миллс Д.Л. (ред.): Поверхностные поляритоны. М.: Наука 1985. 325 с.
3. Barnes W.L., Dereux A., Ebbesen T.W.: *Nature* **424**, 824–830 (2003)
4. Raether H.: *Surface plasmons*. Berlin: Springer 1988. 154 p.
5. Либенсон М.Н.: Соросовский образовательный журн. **10**, 92–98 (1996)
6. Stepanov A.L., Krenn J.R., Ditlbacher H., Hohenau A., Drezet A., Steinberger B., Leitner A., Aussenegg F.R.: *Opt. Lett.* **30**, 1524–1526 (2005)
7. Drezet A., Stepanov A.L., Ditlbacher H., Hohenau A., Steinberger B., Aussenegg F.R., Leitner A., Krenn J.R.: *Appl. Phys. Lett.* **86**, 074104(1–3) (2005)
8. Evlyukhin A.B., Bozhevolnyi S.I., Stepanov A.L., Krenn J.R.: *Appl. Phys. B* **84**, 29–34 (2006)
9. Lezec H.J., Degiron A., Devaux E., Linke R.A., Martin-Moreno L., Garcia-Vidal F.J., Ebbesen T.W.: *Science* **297**, 820–822 (2002)
10. Gonzalez M.U., Weeber J.-C., Baudrion A.-L., Dereux A., Stepanov A.L., Krenn J.R., Devaux E., Ebbesen T.W.: *Phys. Rev. B* **73**, 155416(1–3) (2006)
11. Drezet A., Hohenau A., Koller D., Stepanov A.L., Ditlbacher H., Steinberger B., Aussenegg F.R., Leitner A., Krenn J.R.: *Mat. Sci. Eng. B* **149**, 220–229 (2008)
12. Либенсон М.Н.: Соросовский образовательный журн. **11**, 103–110 (1996)
13. Drezet A., Stepanov A.L., Hohenau A., Steinberger B., Galler N., Ditlbacher H., Leitner A., Aussenegg F.R., Krenn J.R., Gonzalez M.U., Weeber J.-C.: *Europhys. Lett.* **74**, 693–698 (2006)

Исследование структурных, оптических и магнитных свойств титаната бария (BaTiO_3), имплантированного ионами кобальта

Н. И. Халитов, В.Ф. Валеев, Ю. И. Гатиятова, Ю. Н. Осин, Л. Р. Тагиров, Р. И. Хайбуллин

Отдел радиационных воздействий на материалы, лаборатория радиационной физики

Монокристаллические пластинки BaTiO_3 были имплантированы быстрыми ионами Co^+ с высокими дозами с целью формирования мультиферроика. Элементный состав, морфология поверхности, оптические и магнитные свойства имплантированных пластинок BaTiO_3 исследовались методами сканирующей электронной микроскопии, оптической спектроскопии и индукционной магнитометрии. После имплантации исходно прозрачные пластинки титаната бария приобретают сероватый оттенок, что связано с радиационным повреждением их кристаллической структуры, и характерный металлический блеск, обусловленный преципитацией имплантированной примеси в форме наноразмерных частиц металлического кобальта. С ростом дозы имплантации пластинки BaTiO_3 проявляют последовательно суперпарамагнитный и ферромагнитный отклик при комнатной температуре с магнитной анизотропией, характерной для тонкой магнитной плёнки. Последующий термический отжиг в атмосфере воздуха ведёт к восстановлению кристаллической структуры, подавляет ферромагнетизм и окрашивает исследуемые образцы в желтоватые тона. После отжига при температуре выше 720 К на поверхности пластинок BaTiO_3 наблюдается формирование развитого рельефа в виде возвышенностей и углублений нанометрических размеров, что обуславливает значительное снижение отражательной способности образцов в ультрафиолетовой области спектра.

Введение

В настоящее время имеется значительный интерес к синтезу и исследованию мультиферроиков. Мультиферроики – это материалы, обладающие одновременно как пьезоэлектрическими, так и магнитострикционными свойствами, и способные проявлять сильный магнитоэлектрический эффект (МЭЭ) [1]. Взаимная связь между электрическими и магнитными характеристиками в мультиферроиках происходит за счёт изменения механических параметров (растяжения, сжатия) при отклике материала на электрическое (или магнитное) поле. Для наглядности это можно представить следующей формулой:

$$\text{МЭЭ} = \frac{\text{магнитные свойства}}{\text{механические свойства}} \times \frac{\text{механические свойства}}{\text{электрические свойства}}.$$

Мультиферроики, проявляющие высокие значения МЭЭ, в перспективе, могут быть использованы для считывания информации с цифровых устройств, хранящих большой объём данных.

Известно [1], что наиболее высокие значения величины МЭЭ достигаются в нанокompозитных мультиферроиках, основанных на дисперсии наночастиц магнитных металлов в различных сегнетоэлектрических матрицах. В данной работе, с целью получения желаемого нанокompозитного мультиферроика ионы магнитного кобальта были имплантированы в сегнетоэлектрическую матрицу титаната бария (BaTiO_3) с высокими дозами, т.е. с концентрацией, заведомо превышающей предел растворимости примеси кобальта в титанате бария. По-

лучаемая в результате имплантации композитная система нестабильна в виде диспергированных ионов примеси и релаксирует с образованием в облучённом слое подложки новой наноразмерной фазы в форме наночастиц металлического кобальта. Ниже, мы представляем результаты исследования влияния имплантации примеси кобальта и последующего термического отжига на модификацию структурных и физических свойств титаната бария.

Экспериментальная часть

Подложками для ионной имплантации служили монокристаллические (001)-пластины титаната бария с размерами $10 \times 10 \times 0.5$ мм³ (CrysTec, Германия). Пластины BaTiO_3 были имплантированы ионами кобальта с энергией 40 кэВ при постоянной плотности ионного тока 8.0 мкА/см² на ионно-лучевом ускорителе ИЛУ-3 в остаточном вакууме 10^{-5} Торр. Была получена следующая серия экспериментальных образцов с различными дозами (D): 1) CoBT-1 с $D = 0.5 \cdot 10^{17}$ ион/см²; 2) CoBT-2 с $D = 1.0 \cdot 10^{17}$ ион/см²; 3) CoBT-3, CoBT-4, CoBT-5 с $D = 1.5 \cdot 10^{17}$ ион/см². Последующая термическая обработка (отжиг) образцов проводилась в муфельной печи с кварцевым держателем образцов в атмосфере воздуха. Отжиг осуществлялся в несколько стадий при разных температурах: $T_{A1} = 570$, $T_{A2} = 720$, $T_{A3} = 1000$ и $T_{A4} = 1200$ К в течение 30 мин, а также при температуре $T_{A5} = 1200$ К в течение 60 мин с целью детального исследования влияния температуры отжига на свойства исследуемых образцов.

Для расчёта глубины залегания и концентрации имплантированной примеси кобальта в облучённом слое

BaTiO₃ использовалась компьютерная программа SRIM-2008 [2], моделирующая процесс внедрения быстрых ионов в твёрдые тела. Элементный состав и морфология поверхности имплантированного слоя BaTiO₃ были исследованы на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) Zeiss EVO-50XVP в высоковакуумном режиме. Оптические спектры отражения и поглощения образцов были записаны на спектрофотометре Hitachi 330 в ближнем ультрафиолетовом и видимом диапазонах длин волн света (от 200 до 840 нм). Магнитные измерения проводились на экспериментальном коэрцитивном спектрометре при комнатной температуре с развёрткой магнитного поля до 500 мТл. При обработке результатов магнитных измерений диамагнитный вклад от подложки BaTiO₃ был вычтен, а величина регистрируемого магнитного момента была приведена к объёму модифицированного слоя в исследуемом образце.

Результаты и их обсуждение

Согласно расчётам (рис. 1), средний пробег ионов кобальта с энергией 40 кэВ в матрице BaTiO₃ ($\rho = 6.0 \text{ г/см}^3$) составляет величину $R_p \cong 20 \text{ нм}$, а толщина модифицированного поверхностного слоя – величину порядка 40 нм. С ростом дозы имплантации концентрация кобальта монотонно растёт и в пике функции распределения достигает величины более, чем 30 ат.% при максимальной дозе. Столь высокая концентрация кобальта заведомо ведёт к преципитации примеси в форме наноразмерных частиц металлического кобальта.

Как следует из анализа данных СЭМ (рис. 2), после термического отжига при температуре $T_{A2} = 720 \text{ К}$ и выше изначально гладкая поверхность имплантированных

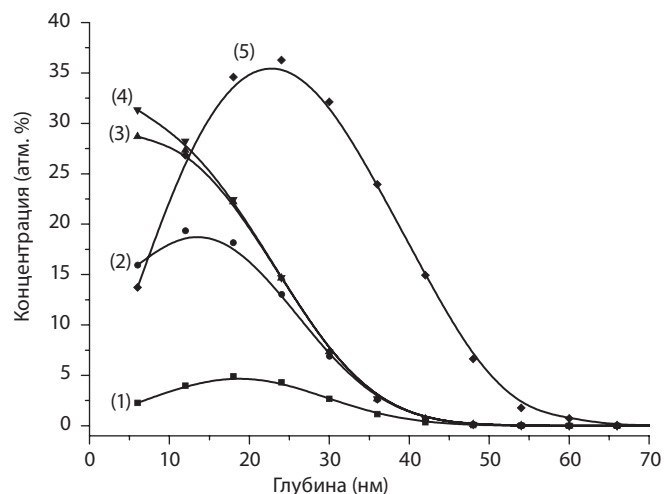


Рис. 1. Глубинные профили распределения концентрации кобальта, имплантированного в матрицу BaTiO₃ с дозами: (1) – $0.1 \cdot 10^{17}$, (2) – $0.5 \cdot 10^{17}$, (3) – $1.0 \cdot 10^{17}$ и (4) – $1.5 \cdot 10^{17}$ ион/см² с учётом распыления облучаемой подложки (коэффициент распыления $S = 2$ атом/ион). Для сравнения на кривой 5 приведён профиль распределения для дозы $1.5 \cdot 10^{17}$ ион/см² без учёта распыления облучаемой подложки.

образцов приобретает развитый рельеф, состоящий из возвышенностей и углублений субмикронных размеров $\sim 0.2\text{--}0.3 \text{ мкм}$. Элементный анализ (элементная картография) показывает, что как структурообразующие элементы Ba, Ti и O, так и внедрённая примесь кобальта равномерно распределены по поверхности образца на субмикронном масштабе, т.е. нет оснований полагать, что наблюдаемый рельеф обусловлен преципитацией кобальта (или его соединений) на поверхности (или в объёме) облучённого слоя титаната бария.

Ионная имплантация привела к существенному изменению оптических свойств титаната бария. Из спектров поглощения (рис. 3а) видно, что после облучения поглощательная способность пластинок выросла, это связано с радиационным повреждением кристаллической структуры облучаемой подложки. Последующая термическая обработка ведёт к восстановлению кристаллической структуры, уменьшению поглощения и окрашиванию пластинок в желтоватые тона. При сравнении спектров

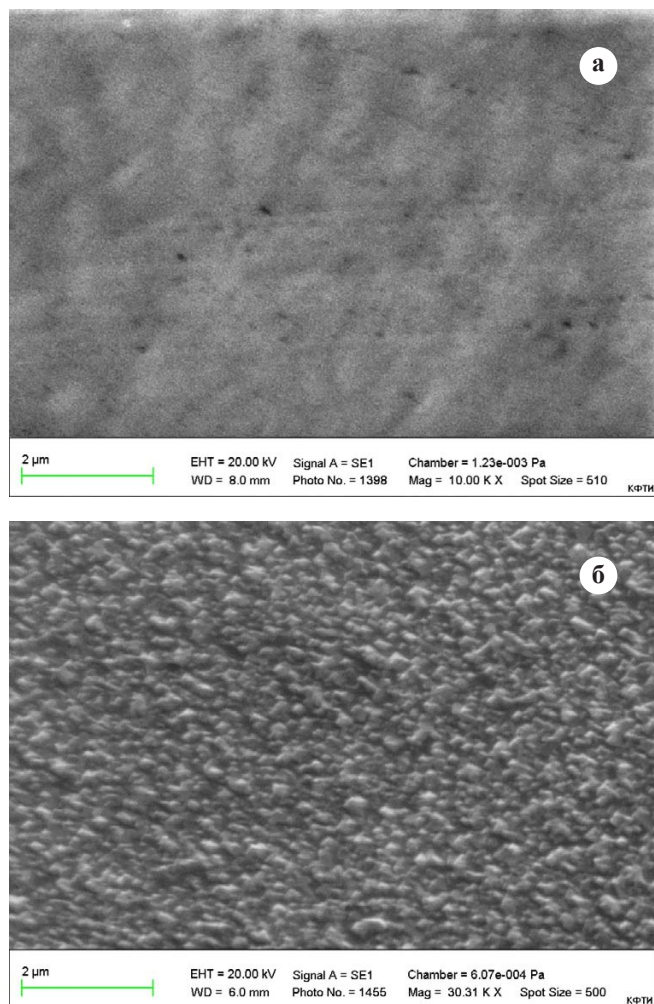


Рис. 2. Морфология поверхности пластинки BaTiO₃, имплантированной кобальтом с дозой $1.5 \cdot 10^{17}$ ион/см²: а непосредственно после ионного облучения и б после термического отжига на воздухе при температуре $T_{A5} = 1200 \text{ К}$.

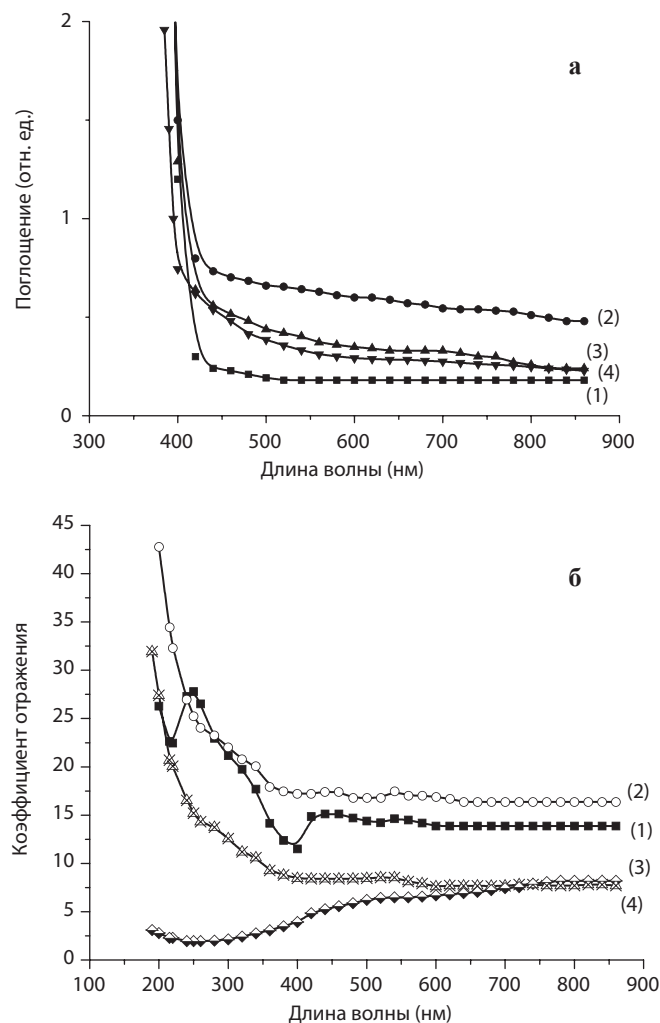


Рис. 3. Оптические спектры поглощения (а) и отражения (б) для исходной пластинки BaTiO₃ (кривая 1), для пластинок, имплантированных кобальтом с дозой $1.5 \cdot 10^{17}$ ион/см² (кривая 2) и затем подвергнутых отжигу на воздухе при 720 К (кривая 3) и при 1200 К (кривая 4).

отражения (рис. 3б) можно видеть резкое снижение отражательной способности образца после заключительной стадии отжига (кривая 4), что связано с формированием развитого рельефа на поверхности пластины, показанного на рис. 2б.

На рис. 4 представлены экспериментальные кривые намагниченности, регистрируемые в плоскости пластинок титаната бария, имплантированных с различными дозами. Видно, что с ростом дозы имплантации пластинки проявляют последовательно суперпарамагнитный и ферромагнитный отклик при комнатной температуре. При максимальной дозе имплантации намагниченность насыщения достигает значения, равного $0.35 \cdot 10^6$ А/м. Принимая во внимание, что намагниченность насыщения объёмного кобальта составляет $1.4 \cdot 10^6$ А/м, можно говорить о формировании гранулярной плёнки кобальта в облучённом слое BaTiO₃ с фактором металлического наполнения порядка 40%. Детальные исследования угловой зависимости петли магнитного гистерезиса показали, что

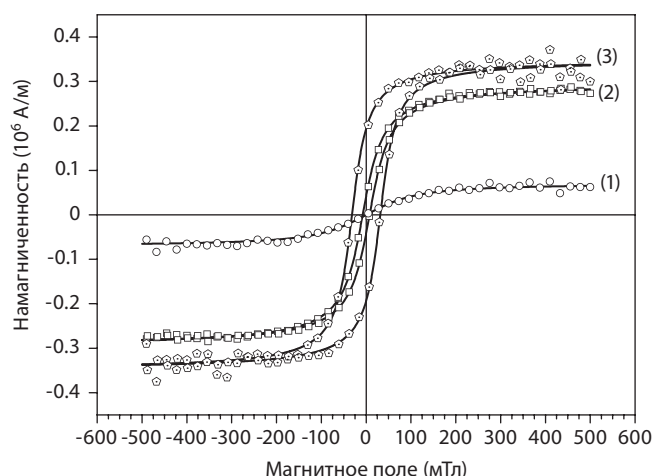


Рис. 4. Кривые намагничивания пластинок BaTiO₃, имплантированных кобальтом с дозами: (1) – $0.5 \cdot 10^{17}$, (2) – $1.0 \cdot 10^{17}$ и (3) – $1.5 \cdot 10^{17}$ ион/см², соответственно. Символы соответствуют экспериментальным данным, а сплошные линии – результат моделирования магнитных кривых.

наблюдаемый ферромагнетизм проявляет анизотропию формы “легкая” плоскость, характерную для тонкой ферромагнитной плёнки. В частности установлено, что форма и параметры петли гистерезиса не меняются при изменении ориентации магнитного поля в *in-plane* геометрии, что свидетельствует об отсутствии магнитной анизотропии в плоскости образца. С другой стороны, при сканировании магнитного поля, приложенного перпендикулярно плоскости пластинки (*out-of-plane* геометрия), достичь насыщения для намагниченности не удаётся даже при максимальном значении поля 500 мТл. Это указывает на то, что направление нормали к плоскости имплантированной пластинки является осью “трудного” намагничивания.

Экспериментальные кривые намагничивания, представленные на рис. 4, в случае суперпарамагнитного отклика в образце были смоделированы с использованием формулы Ланжевена [3]:

$$M = M_s \cdot [\coth(x) - 1/x],$$

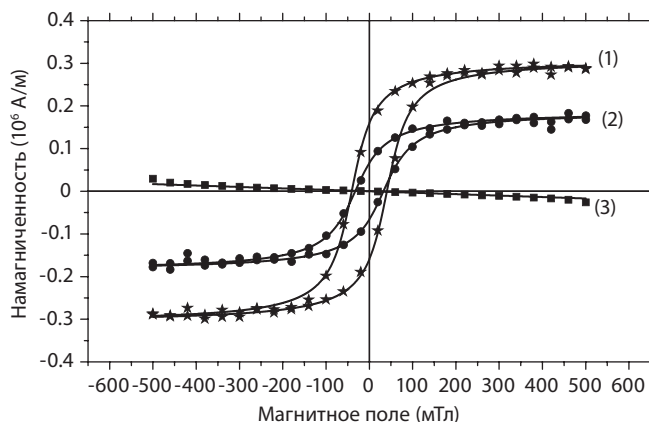
где M – намагниченность образца; M_s – намагниченность насыщения, равная $M_s = N_p \cdot M_{Co} \cdot \langle V_p \rangle$; N_p – концентрация наночастиц кобальта в образце; M_{Co} – намагниченность насыщения массивного кобальта; $\langle V_p \rangle$ – средний объём наночастиц кобальта; $x = M_{Co} \cdot \langle V_p \rangle \cdot H / k_B \cdot T$; H – внешнее магнитное поле; k_B – постоянная Больцмана; T – температура. В случае ферромагнитного отклика была использована эмпирическая формула, предложенная в работе [4], для ферромагнитного гистерезиса:

$$M = M_s \frac{2}{\pi} \cdot \arctg \left(\frac{H \pm H_C}{H_T} \right),$$

где M_s – намагниченность насыщения, H_C – коэрцитивное поле, H_T – пороговое значение поля магнитной анизо-

Таблица 1. Дисперсные параметры гранулярных плёнок кобальта, синтезированных в BaTiO_3 при различных дозах имплантации.

Образец	Доза имплантации (D) $\times 10^{17}$ (ион/см 2)	Концентрация наночастиц (N_p) $\times 10^{17}$ (см $^{-3}$)	Средний объём (V_p) $\times 10^{-20}$ (см 3)	Средний диаметр (d) (нм)
CoBT-1	0.5	7.7	6.5	5.0
CoBT-2	1.0	23	8.7	5.5
CoBT-3	1.5	7.5	32.1	8.5

**Рис. 5.** Кривые намагничивания для пластины BaTiO_3 , имплантированной кобальтом с дозой $1.5 \cdot 10^{17}$ ион/см 2 : (1) — непосредственно после имплантации; (2) — после отжига на воздухе при температуре $T_{A1} = 600$ К; (3) — после отжига при температуре $T_{A2} = 720$ К.

тропии, превышение которого приводит к однородной намагниченности всего объёма образца. Поскольку при моделировании в формулу входит произведение определяемых величин ($M_s = N_p \cdot M_{Co} \cdot \langle V_p \rangle$), дополнительно использовалась следующая формула из работы [4]:

$$H_c = H_{c0} [1 - (V_{cr}/V_p)^{1/2}],$$

где H_{c0} — коэрцитивная сила частицы при $T = 0$, V_{cr} — критический диаметр частицы при переходе частицы из суперпарамагнитного в ферромагнитное состояние. Результаты моделирования сведены в таблицу 1. Как видно из данных таблицы, средний диаметр (d) наночастиц кобальта возрастает с ростом дозы имплантации.

Установлено, что термический отжиг на воздухе при температуре 720 К подавляет наведённый имплантацией кобальта ферромагнетизм, и отожжённые при этой и более высоких температурах пластины проявляют диамагнитные свойства (рис. 5). Данный эффект следует связывать с окислением наночастиц кобальта при высо-

ких температурах. Образующийся оксид кобальта является антиферромагнетиком с низкой температурой Нееля, и, следовательно, не оказывает какого-либо существенного влияния на магнитные свойства образцов при комнатной температуре.

Заключение

Имплантация ионов кобальта в монокристаллические пластинки BaTiO_3 с высокими дозами ведёт к формированию в поверхностном слое облучённой подложки ферромагнитной гранулярной плёнки кобальта. Средний диаметр гранул кобальта составляет величину порядка 5–8 нм. Последующий высокотемпературный отжиг на воздухе подавляет наведённый имплантацией кобальта ферромагнетизм и оказывает сильное влияние на морфологию поверхности имплантированных пластин BaTiO_3 . На поверхности образуется развитый рельеф субмикронного масштаба. Формирование развитого рельефа в имплантированных и последовательно отожжённых пластинках BaTiO_3 обуславливает резкое снижение коэффициента отражения пластин в ультрафиолетовом диапазоне длин волн.

Работа была поддержана РФФИ (грант № 07-02-00559) и Федеральным агентством по образованию (госконтракт № П902) в рамках ФЦП “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России”.

Литература

1. Nan C.W., Bichurin M.I., Dong Sh., Viehland D., Srinivasan. G.: J. Appl. Phys. **103**, 031101(1-35) (2008)
2. Ziegler J.F., Biersack J.P., Littmark U.: The stopping and range of ions in solids. New York: Pergamon Press 1985. (SRIM-2008 software at <http://www.srim.org>)
3. Киттель Ч.: Введение в физику твёрдого тела. М.: Наука 1978. 729 с.
4. Kneller E.F., Luborsky F.E.: J. Appl. Phys. **34**, 656–662 (1963)

Исследование методом ЭПР уровня Cu^{2+} -церулоплазмينا в крови онкоурологических больных

М. И. Ибрагимова, А. И. Чушников, В. Ю. Петухов, Е. П. Жеглов

Отдел радиационных воздействий на материалы, лаборатория радиационной химии и радиобиологии

Методом ЭПР проведено систематизированное исследование уровня церулоплазмينا (ЦП) в венозной крови онкологических больных со злокачественными новообразованиями на I–IV стадиях развития, локализованными в мочевом пузыре и почках. В качестве контроля были выбраны две группы, состоящие из доноров, рассматриваемых как условно здоровая категория людей и пациентов поликлиники, часть из которых имела заболевания неонкологической природы на момент забора крови. Величина Cu^{2+} -ЦП практически не зависит от локализации и дифференцировки опухоли. Рассмотрена корреляция между концентрацией Cu^{2+} -ЦП и величиной СОЭ в крови онкоурологических больных. Показано, что определение концентрации ЦП при величине СОЭ, превышающей норму, может быть целесообразным для ранней диагностики онкопатологии, а также являться дополнением к биологическому индивидуальному скринингу больных в предоперационный период для выбора правильной и эффективной тактики лечения.

Введение

Одним из белков плазмы крови, обладающих парамагнитными свойствами, является церулоплазмин (ЦП) – медь-содержащий гликопротеид [1]. Этот белок выполняет в организме ряд важных биологических функций: оказывает антиоксидантное действие; тормозит перекисное окисление липидов; повышает стабильность клеточных мембран; участвует в метаболизме железа, в иммунологических реакциях, ионном обмене и регуляции уровня биогенных аминов. Было установлено, что концентрация ЦП в сыворотке крови увеличивается как при острых, так и при хронических воспалительных процессах, в частности, при инфаркте миокарда, атеросклерозе, шизофрении и онкологических заболеваниях [2].

В работах [3–9] возрастание уровня ЦП в крови рассматривается как диагностический онкомаркер наличия злокачественных новообразований (ЗНО) в молочной железе [3, 9], голове и шее [9], желудочно-кишечном тракте [9], простате [4, 6], яичках [7], лёгких [8, 9]. Вместе с тем, работ по изучению уровня ЦП при ЗНО в мочевом пузыре и почках в литературе нами не найдено.

На практике среди методов определения концентрации ЦП основное предпочтение отдаётся нефелометрии и имунотурбидиметрии [4, 9]. Однако, поскольку в структуре молекулы ЦП содержатся семь ионов меди, из которых 44% обладают парамагнитными свойствами [10], то для исследования уровня этого белка применяется и метод ЭПР [5, 10, 11–13]. К преимуществам ЭПР по сравнению с биохимическими методами можно отнести его экспрессность, высокую чувствительность и отсутствие необходимости использования каких-либо химических реактивов. В работе [5] показано существование линейной зависимости между концентрацией парамагнитных ионов меди, определённой методом ЭПР, и концентрацией ЦП,

определённой химическим способом, в образцах крови в норме и при патологических изменениях в организме больных.

В данной работе методом ЭПР проведено систематизированное исследование изменения уровня Cu^{2+} -ЦП в венозной крови больных при ЗНО I–IV стадий в почках и мочевом пузыре для разработки метода диагностики онкоурологической патологии.

Методика эксперимента

Основа методики эксперимента описана в работе [1]. В данной работе исследовано 93 образца крови онкоурологических больных со ЗНО на I–IV стадиях роста в мочевом пузыре (49 пациентов, из них 21 больной с опухолевым процессом на I стадии) и почках (44 пациента, из них также 21 больной с опухолевым процессом на I стадии). В предоперационный период проводился общий и биохимический анализы крови. После хирургического вмешательства ткань удалённой опухоли гистологически классифицировалась согласно показателям параметра $T_{1-4}N_{0-3}M_{0-1}G_{1-3}$.

В качестве контроля были выбраны две группы. Первая группа – 40 доноров, сдавших кровь на станции переливания крови и рассматриваемых нами как условно здоровые люди. Вторая группа – это 32 пациента поликлиники КазНЦ РАН, часть из которых имеет заболевания неонкологической природы на момент забора крови.

Результаты исследований и обсуждение

Хорошо известно, что при отсутствии патологических изменений в организме концентрация белков остаётся практически неизменной со временем. Исследованная нами

динамика изменения уровня Cu^{2+} -ЦП в крови доноров крови не выявила никаких отклонений от нормы [12].

Результат обработки спектров ЭПР крови представлен на рис. 1 в виде гистограмм распределения количества пациентов и волонтеров по уровню Cu^{2+} -ЦП. Гистограммы наглядно иллюстрируют существующие различия в диапазонах изменения концентрации Cu^{2+} -ЦП между исследованными группами пациентов. Как видно из рис. 1б, диапазон распределения Cu^{2+} -ЦП для доноров достаточно узкий: 15–60 отн. ед. Средняя величина Cu^{2+} -ЦП и её стандартное отклонение ($M \pm m$) для этой группы сос-

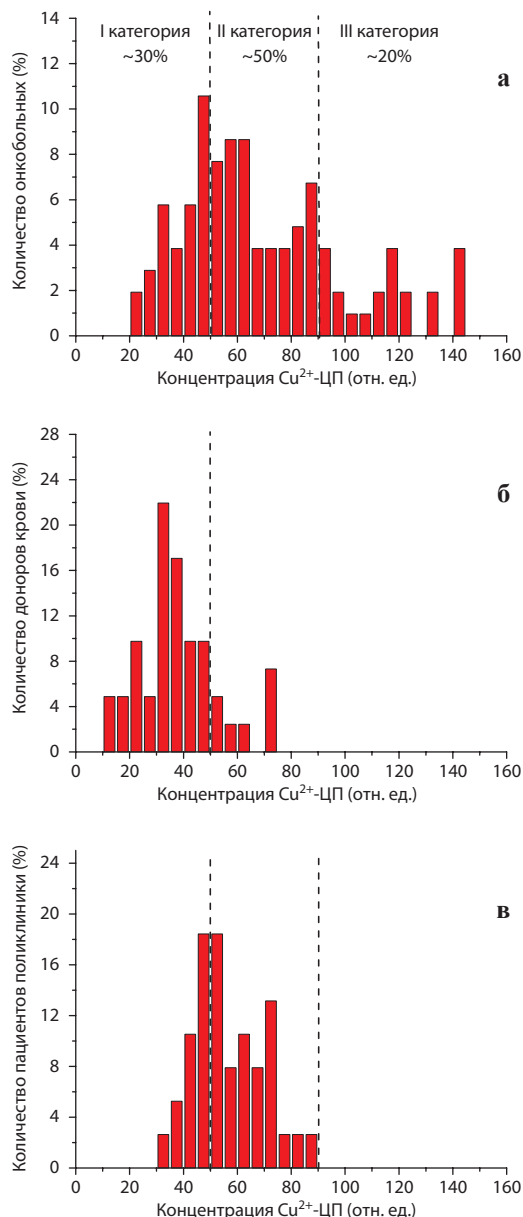


Рис. 1. Гистограммы распределения количества пациентов и волонтеров по уровню Cu^{2+} -ЦП, полученные на основе обработки спектров ЭПР крови больных со ЗНО в почке и мочевом пузыре (а) и у двух контрольных групп: условно здоровых людей – доноров крови (б) и пациентов поликлиники, часть из которых имеет заболевания неонкологической природы (в).

тавляют 36 ± 14 отн. ед. Для второй контрольной группы гистограмма смещена в область больших концентраций Cu^{2+} -ЦП (рис. 1в), и значения $M \pm m$ равны 56 ± 12 отн. ед. Считая уровень ЦП в крови доноров за норму, для пациентов поликлиники увеличение концентрации парамагнитной фазы Cu^{2+} -ЦП составляет в среднем $\sim 55\%$.

При онкоурологической патологии, как видно из рис. 1а, диапазон изменения концентрации Cu^{2+} -ЦП существенно шире: от 20 до 145 отн. ед. При этом максимум распределения ЦП сдвинут в область больших концентраций, вдвое превышая значение для доноров. Независимо от стадии роста опухоли величины $M \pm m$ равны 68 ± 29 и 71 ± 29 отн. ед. при раке почки и мочевого пузыря, соответственно.

Одним из неспецифических показателей наличия воспалительных процессов в организме является величина СОЭ (скорость оседания эритроцитов). Обычно считается, что норма СОЭ для мужчин 2–10 мм/ч, для женщин – 2–15 мм/ч. Поскольку одним из белков, дающих вклад в СОЭ, является ЦП, проанализируем соотношение этих двух показателей в крови онкоурологических больных. График, иллюстрирующий корреляцию между концентрацией Cu^{2+} -ЦП и СОЭ в крови онкоурологических больных, приведён на рис. 2. На вставке к рисунку отдельно выделена зависимость СОЭ от уровня ЦП для I стадии развития опухолей в почке и мочевом пузыре. Как видно из рис. 2, всех обследованных онкоурологических больных можно условно разделить на три категории.

Первая категория – это онкобольные, величина парамагнитной фазы меди ЦП у которых не превышает 45 отн. ед. Для $\sim 80\%$ доноров концентрация Cu^{2+} -ЦП приходится именно на этот интервал.

Из рис. 2 видно, что у онкобольных при величине Cu^{2+} -ЦП менее 45 отн. ед. уровень СОЭ соответствует

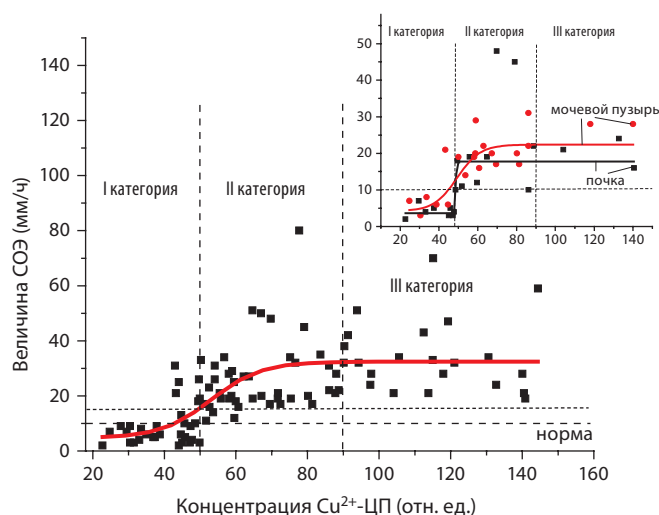


Рис. 2. Корреляционная зависимость между величиной СОЭ и концентрацией парамагнитных ионов Cu^{2+} в ЦП у онкоурологических больных. На вставке – данные для больных на I стадии развития опухолей в почке и мочевом пузыре. Сплошная линия – результат статистической обработки.

норме, тогда как увеличение уровня Cu^{2+} -ЦП более 45 отн. ед. практически однозначно сопровождается повышением СОЭ. В эту, не диагностируемую онкопатологическую категорию, при данной выборке попадает ~ 25% от общего количества обследованных онкобольных. Это, главным образом, больные с опухолевым процессом на I стадии развития.

У большей части больных (~75%) уровень Cu^{2+} -ЦП превышает 45 отн. ед. Эта величина коррелирует с верхней границей $M \pm m = 36 \pm 14$ отн. ед. для контрольной группы доноров. Сопоставительный анализ данных ЭПР-спектроскопии и СОЭ для второй контрольной группы показал, что превышение величины Cu^{2+} -ЦП более 55 отн. ед. действительно характеризуется повышением значения СОЭ.

Вторая категория – это онкоурологические больные с уровнем Cu^{2+} -ЦП в интервале 45–90 отн. ед. Величина Cu^{2+} -ЦП, равная 90 отн. ед., соответствует верхней границе, зарегистрированной для пациентов из второй контрольной группы, имеющих заболевания без диагноза “онкология”. Доля онкобольных, попадающих во вторую категорию, составляет ~55% от общего числа обследованных пациентов.

Третья категория – это больные с высоким уровнем Cu^{2+} -ЦП (более 90 отн. ед.) и величиной СОЭ, превышающей норму. Такой показатель Cu^{2+} -ЦП зарегистрирован у ~20% от общего числа обследованных больных, включая пациентов с опухолевым процессом на I стадии развития.

В результате исследований установлено, что уровень парамагнитной фазы Cu^{2+} -ЦП, коррелирующий с общей концентрацией сывороточного ЦП [5], при онкологической патологии в мочевом пузыре и почках может изменяться в широком диапазоне – от значений, присущих практически нижней границе для нормы, до значений, значительно превышающих верхнюю границу для заболеваний неонкологической природы. При этом выявлено, что уровень Cu^{2+} -ЦП практически не зависит от локализации и дифференцировки опухоли, а также от возраста и пола пациента.

Таким образом, при отсутствии других болезней, таких как цирроз печени, артрит, пиелонефрит, атеросклероз, инфаркт миокарда, шизофрения, уровень ЦП в крови,

превышающий верхнюю границу для нормы, с большой вероятностью является диагностическим показателем наличия онкологической патологии.

Поэтому мы считаем, что контроль уровня ЦП уже при известном диагнозе “онкология” в мочеполовой системе может быть весьма полезным дополнением к биологическому индивидуальному скринингу больных в предоперационный период для выбора правильной и эффективной тактики лечения.

Авторы выражают благодарность В. Н. Моисееву, сотруднику Республиканского клинического онкологического диспансера, а также В. И. Погорельцеву и Н. Б. Хардиной, сотрудникам Поликлиники КазНЦ РАН, за сотрудничество в выполнении данной работы.

Литература

1. Ибрагимова М.И., Петухов В.Ю., Жеглов Е.П.: Особенности спектров ЭПР онкологических больных. Казанский физико-технический институт имени Е. К. Завойского 2006. Ежегодник, с. 58–61. Казань: ФизтехПресс 2007.
2. Gutteridge J.M.C., Stocks J.: *Cri. Rev. Clin. Lab. Sci.* 257–329 (1981)
3. Сидоренко Ю.С., Горошинская И.А., Владимиров Л.Ю., Нескубина И.В., Немашкалова Л.А., Шалашная Е.В.: Патент РФ RU2241987 (2002)
4. Foutiou K., Vaiopoulos G., Lilakos K., Giannopoulos A., Mandalenaki K., Marinos G., Koritsiadis G., Sourdis J., Konstantenidou E., Konstantopolos K.: *Minerva Urol. Nefrol.* **59**, 407–411 (2007)
5. Mailer C., Swartz H.M., Konieczny M., Ambegaonkar S., Moore V.C.: *Cancer Res.* **34**, 637–642 (1974)
6. Nayak S.B., Bhat V.R., Upadhyay D., Udupa S.L.: *Indian J. Physiol. Pharmacol.* **47**, 108–110 (2003)
7. Nayak S.B., Bhat V.R., Mayya S.S.: *Indian J. Physiol. Pharmacol.* **48**, 486–488 (2004)
8. Nayak S.B., Yashwantch S., Pinto S.M., Bhat V.R., Mayya S.S.: *Indian J. Physiol. Pharmacol.* **49**, 341–344 (2005)
9. Senra-Varela A., Bosco Lopez Saez J.J., Quintella Senra D.: *Can. Lett.* **121**, 139–145 (1997)
10. Dawson J.H., Dooley D.M., Clark R., Stephens P.J., Gray H.B.: *J. Am. Chem. Soc.* **101**, 5046–5053 (1979)
11. Ажипа Я.И.: Медико-биологические аспекты применения метода электронного парамагнитного резонанса. М.: Наука 1983. 528 с.
12. Ибрагимова М.И., Чушников А.И., Петухов В.Ю., Жеглов Е.П.: Клиническая физиология кровообращения № 3, 51–54 (2008)
13. Пулатова М.К., Рихирёва Г.Т., Куроптёва З.В.: Электронный парамагнитный резонанс в молекулярной радиобиологии. М.: Энергоатомиздат 1989. 232 с.

Парамагнитные ассоциаты примесных дефектов в кристалле $\text{Ba}_{1-x}\text{Ni}_x\text{F}_{2+y}$: данные изучения методом ЭПР

В. А. Уланов, Г. С. Шакуров, М. М. Зарипов

Лаборатория радиоспектроскопии диэлектриков

В кристаллах $\text{Ba}_{1-x}\text{Ni}_x\text{F}_{2+y}$ методом ЭПР обнаружены новые центры примесного никеля тетрагональной и моноклинной симметрий. На основе анализа условий синтеза и угловых зависимостей спектров ЭПР обнаруженных центров предложены модели их молекулярных структур и высказаны предположения о механизмах их образования.

Введение

Известно, что образование собственных и примесных дефектов в кристаллах приводит к повышению энергии кристаллической решётки [1, 2]. Эти дефекты можно перевести в квазисвободное состояние путём термической активации. При этом дефект преодолевает энергетический барьер и переходит в соседнюю потенциальную “яму” с более высокой энергией. Результатом является существенное ослабление связей дефекта с решёткой и ускорение темпов его диффузионного движения. Дефекты, участвующие в диффузионном процессе, могут приблизиться друг к другу на малое расстояние, и между ними может возникнуть достаточно сильное взаимодействие. В тех случаях, когда энергия такого взаимодействия оказывается отрицательной, дефекты образуют в объёме кристалла стабильный ассоциат с регулярной структурой [2, 3].

Авторы данного исследования считают, что кристаллохимическими реакциями между точечными дефектами можно управлять и получать упакованные в кристалл сложные микроструктуры с необычными физическими свойствами. Нами установлено, что в качестве среды для синтеза многоядерных примесных кластеров с регулярной структурой могут быть использованы ионные кристаллы структурной группы флюорита [4–6]. Но для того, чтобы такой синтез проводить целенаправленно, необходимы исчерпывающие сведения о свойствах точечных дефектов (будущих фрагментов синтезируемой микроструктуры). Кроме того, необходима информация о молекулярных структурах и свойствах образующихся кластеров, о транспортных свойствах кристаллов-матриц, о механизмах реакций между дефектами, стимулирующих образование кластерных дефектов и т.д. Однако до настоящего времени нет чёткой картины того, как протекают и от чего зависят процессы твёрдофазного синтеза примесных кластеров в объёмах кристаллических тел. Настоящая работа посвящена изучению условий образования, молекулярной структуры и магнитных свойств ассоциативных центров примесных ионов никеля, образующихся в кристаллах BaF_2 при их выращивании из расплава.

Эксперимент

В данной работе были использованы две группы образцов кристаллов $\text{BaF}_2:\text{Ni}$, содержащих в своем объёме парамагнитные центры примесных ионов никеля. Образцы первой группы были выращены методом Бриджмена в атмосфере гелия с небольшими добавками продуктов термического разложения фторопласта (примерно 0.5% по объёму). В качестве материала тигля для расплава $\text{BaF}_2:\text{Ni}$ был использован химически чистый графит. Примесь никеля вводилась в расплав в виде мелкодисперсного металлического порошка. Количество примеси примерно соответствовало 0.05 ат.%. Добавление продуктов разложения фторопласта в атмосферу выращивания кристалла имело целью создание нестехиометрического расплава с небольшим избытком ионов фтора. Это способствовало повышению равновесной концентрации растворённого в расплаве никеля. Как оказалось, именно присутствие в расплаве избыточных ионов фтора является необходимым условием внедрения никеля в решётку растущего кристалла.

При приготовлении образцов второй группы были использованы беспримесные кристаллы BaF_2 , выращенные методом Бриджмена в атмосфере гелия. Из кристаллов выкалывались кусочки с приблизительными размерами $15 \times 15 \times 5$ мм³. Эти кусочки кристалла помещались в цилиндрический графитовый контейнер и засыпались опилками химически чистого металлического никеля. Контейнер помещался в индукционную печь в атмосферу гелия с небольшими добавками продуктов термического разложения фторопласта и выдерживался при температуре 1000 °С в течение 5 часов.

Измерения проводились на частотах 9.3 и 37 ГГц на спектрометре ЭПР E-12 фирмы Вариан, а также на перестраиваемом субмиллиметровом спектрометре ЭПР в диапазоне частот 75–300 ГГц. Во всех образцах были обнаружены спектры ЭПР трёх типов центров, два из которых обладали тетрагональной симметрией, а один вид центров – моноклинной симметрией. Тетрагональные центры первого типа известны. Они наблюдались авто-

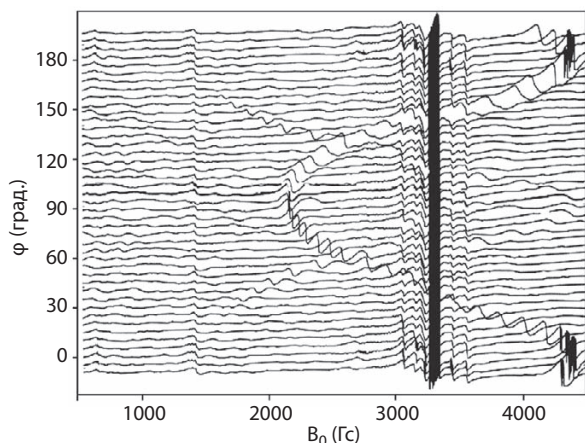


Рис. 1. Угловая зависимость спектров ЭПР образца $\text{BaF}_2:\text{Ni}$ при $T = 4.2$ К в X-диапазоне (плоскость вращения примерно совпадает с плоскостью $\{110\}$).

рами работы [7] и соответствуют примесному иону Ni^+ , замесившему катион Ba^{2+} и сместившемуся из центра координационного куба замещённого катиона вдоль одной из кристаллографических осей $\langle 001 \rangle$. Тетрагональные центры второго типа и центры моноклинной симметрии получены в данной работе впервые. Если судить по интегральным интенсивностям спектров ЭПР, концентрации трёх видов наблюдаемых центров в образцах первой группы оказались примерно на одном уровне. Но эти концентрации в образцах второй группы были на порядок выше, хотя соотношение между концентрациями центров разного вида остались почти такими же.

В спектрах ЭПР образца $\text{BaF}_2:\text{Ni}$ в X-диапазоне при 4.2 К (рис. 1) одновременно наблюдаются резонансные линии от трёх ансамблей магнитно-неэквивалентных центров тетрагональной симметрии.

Кроме линий, принадлежащих центрам тетрагональной симметрии, на рис. 1 видны также компоненты тонкой и сверхтонкой структуры спектра ЭПР кубических центров

$[\text{MnF}_8]^{6-}$, расположенные в интервале магнитных полей от 3050 до 3560 Гс.

Резонансные переходы, обусловленные центрами моноклинной симметрии в X-диапазоне, не наблюдаются (как при $T = 4.2$ К, так и при $T = 77$ К) из-за значительного начального расщепления между спиновыми уровнями энергии их основного орбитального состояния.

На рис. 2 и 3 показаны угловые зависимости величины резонансного магнитного поля, $B_{\text{рез}}(\varphi)$ для тетрагональных центров второго типа, полученные на частотах 98.6 ГГц (субмиллиметровый диапазон) и 9.3 ГГц (X-диапазон) при температуре 4.2 К. Угол φ соответствует вращению образца вокруг одной из кристаллографических осей $\langle 100 \rangle$. Квадратики (рис. 2) и кружочки (рис. 3) обозначают экспериментальные значения $B_{\text{рез}}(\varphi)$, а линии построены на основе расчёта собственных значений спинового гамильтониана

$$\mathcal{H}_S = B_{20}O_{20} + B_{40}O_{40} + B_{44}O_{44} + \mu_B[g_{\perp}(B_{0x}S_x + B_{0y}S_y) + g_{\parallel}B_{0z}S_z], \quad (1)$$

где $S = 2$; $B_{20} = 29.09 \pm 0.2$ ГГц; $B_{40} = -0.11 \pm 0.01$ ГГц; $B_{44} \approx 0$; $g_{\parallel} = 2.98$; $g_{\perp} = 2.12$. Попытки описания экспериментальных угловых зависимостей в спектрах ЭПР тетрагональных центров второго типа предположением о спиновом моменте центра $S = 1$ закончились неудачей. Спектры ЭПР центров моноклинной симметрии наблюдались на частоте 37 ГГц при температурах 4.2 и 77 К. При комнатных температурах спектры этих центров не наблюдаются.

Угловые зависимости в наблюдаемых спектрах описываются спиновым гамильтонианом

$$\mathcal{H}_S = B_{20}O_{20} + B_{22}O_{22} + \mu_B[g_x B_{0x}S_x + g_y B_{0y}S_y + g_z B_{0z}S_z], \quad (2)$$

где $S = 1$; $B_{20} = 12.4$ ГГц; $B_{22} = -0.5$ ГГц; $g_x = g_y = 3.32$; $g_z = 2.45$.

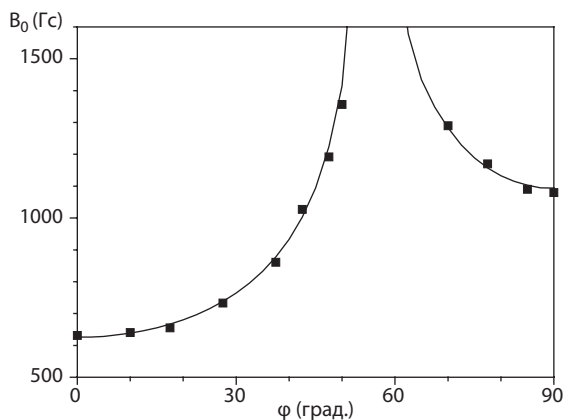


Рис. 2. Зависимости $B_{\text{рез}}(\varphi)$, полученные для тетрагональных центров на частоте 98.6 ГГц при температуре 4.2 К (вращение вокруг одной из осей $\langle 110 \rangle$); ■ – эксперимент, линии – расчёт.

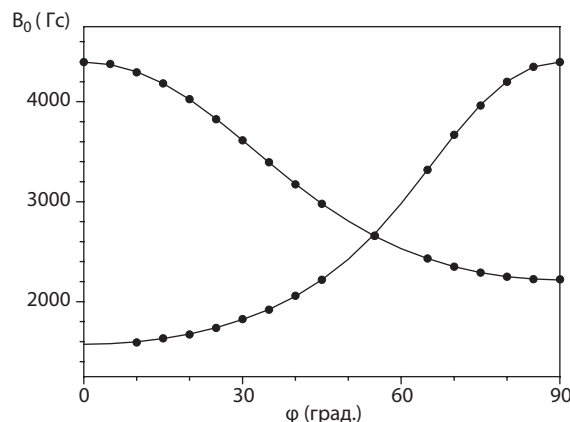


Рис. 3. Зависимости $B_{\text{рез}}(\varphi)$, полученные для тетрагональных центров на частоте 9.3 ГГц при температуре 4.2 К (вращение вокруг одной из осей $\langle 110 \rangle$); ● – эксперимент, линии – расчёт.

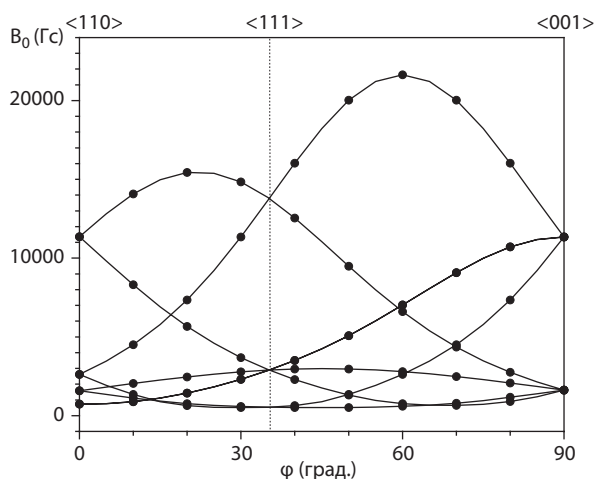


Рис. 4. Зависимости $B_{\text{рез}}(\phi)$, полученные для моноклинных центров на частоте 37.1 ГГц при температуре 4.2 К (резонансный переход $|0\rangle \leftrightarrow |-1\rangle$, вращение вокруг одной из осей $\langle 110 \rangle$; ● – эксперимент, линии – расчёт).

Спиновый гамильтониан (2) представлен в локальной системе координат, у которой ось Y перпендикулярна одной из кристаллографических плоскостей $\{110\}$, а ось Z повернута вокруг оси Y на угол $\alpha = 60^\circ$. Поскольку симметрия кристалла BaF_2 относится к группе O_h , то в его объёме образуется 12 ансамблей магнитно-неэквивалентных центров моноклинной симметрии. На рис. 4 представлены экспериментальные точки для частоты 37.1 ГГц и температуры 4.2 К и расчётные значения величин $B_{\text{рез}}(\phi)$, полученные с гамильтонианом (2), соответствующие резонансному переходу $|0\rangle \leftrightarrow |-1\rangle$.

Обсуждение результатов

Рассмотрим сначала экспериментальные результаты, полученные по тетрагональным центрам второго типа.

Возможные валентные состояния для примесных ионов никеля в ионном кристалле со структурой флюорита следующие: Ni^+ ($3d^9$, $S = 1/2$); Ni^{2+} ($3d^8$, $S = 1$); Ni^{3+} ($3d^7$, $S = 3/2$). Наблюдаемые угловые зависимости резонансных значений магнитного поля и амплитуд линий спектров ЭПР тетрагональных центров второго типа явно указывают на целочисленное значение их спинового момента. Описать эти зависимости удалось лишь в предположении, что обнаруженные центры имеют спиновый момент $S = 2$. Такой момент мог бы иметь центр, образованный в исследуемом кристалле одиночным ионом Ni^{4+} ($3d^6$), находящимся в высокоспиновом состоянии. Однако, подобная ситуация нам представляется маловероятной, поскольку до настоящего времени в решётках ионных кристаллов неизовалентное замещение типа $\text{Me}_A^{4+} \leftrightarrow \text{Me}_B^{4+}$ экспериментально не наблюдалось (что, по-видимому, связано с энергетической невыгодностью такого процесса или с тем, что внедрившийся ион оказывается в низкоспиновом состоянии, $S = 0$). Поэтому мы полагаем,

что обнаруженные тетрагональные центры второго типа представляют собой обменно-связанные пары $\text{Ni}^{2+}\text{-Ni}^{2+}$ или $\text{Ni}^{3+}\text{-Ni}^+$. Как следует из данных эксперимента, ось симметрии рассматриваемого центра направлена вдоль одной из кристаллографических осей $\langle 001 \rangle$. Поэтому наиболее вероятным является предположение, что ионы никеля в паре заместили катионы решётки (Ba^{2+}), расположенные по соседству друг с другом по линии, параллельной оси $\langle 001 \rangle$. Если не рассматривать смещения ближайших к ионам никеля анионов (ионов F^-), то модель синтезированного парного центра можно представить так, как это показано на рис. 5. Данные ЭПР не позволяют определить валентные состояния ионов никеля в паре. По найденной величине спинового момента ($S = 2$) пары можно говорить лишь о том, что сумма валентностей этих ионов равна 4. Однако, отвечая на вопрос о валентных состояниях ионов никеля в парных центрах, следует учесть экспериментальный факт – примерное равенство концентраций парных и одиночных центров никеля (центров первого типа) в исследуемых образцах. Если бы образование парных центров не было связано с выигрышем энергии, то их концентрация была бы много ниже концентрации тетрагональных центров первого типа. Поскольку это не так, то следует искать причину такого выигрыша энергии, которое бы превышало величину kT (только тогда вероятность образования парного дефекта будет выше вероятности его последующего распада). Одна из возможных причин – обменное взаимодействие между примесными ионами. Но в кристалле BaF_2 ближайшее расстояние между катионами, расположенными вдоль оси $\langle 001 \rangle$, равно 6.2 Å. На таких расстояниях обменное взаимодействие между изовалентными ионами обычно не превышает нескольких десятков обратных сантиметров, в то время как в случае образцов второй группы $kT = 910 \text{ см}^{-1}$. Однако, если предположить, что мы получили пару ($\text{Ni}^{3+}\text{-Ni}^+$), то, кроме обменного взаимодействия, необходимо рассматривать также кулоновское взаимодействие локально нескомпенсированных зарядов примесных дефектов замещения Ni^{3+} и Ni^+ . В результате получаем энергию взаимодействия, существенно превышающую указанную величину kT .

Очевидно, что обнаруженная пара может находиться в состояниях со спиновыми моментами $S = 1$ и $S = 2$. Из эксперимента следует, что основным является состояние с $S = 2$, которое расщепилось на основной синглет ($M_S = 0$)

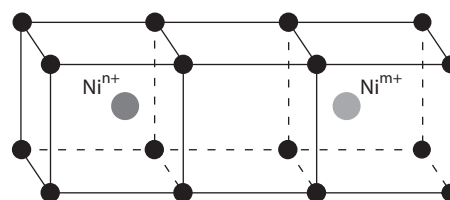


Рис. 5. Модель молекулярной структуры тетрагонального центра второго типа (чёрными кружками представлены анионы, относящиеся к первой сфере окружения ионов никеля; $n + m = 4$).

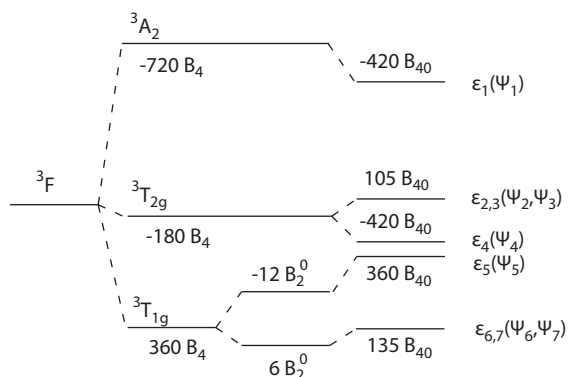


Рис. 6. Возможная картина расщеплений 3F -терма иона Ni^{2+} , образовавшего кластер $[NiF_4F_4F_{int}]^{7-}$ (C_{4v}) в кристалле $BaF_2:Ni$.

и два дублета ($M_S = \pm 1$ и $M_S = \pm 2$). Энергетические интервалы между указанными синглетом и дублетами равны 100.5 и 255.2 ГГц, соответственно. ЭПР между состояниями возбуждённого спинового мультиплета ($S = 1$) по-видимому не наблюдается из-за низкой их заселённости, поскольку энергетический интервал между мультиплетами $S = 2$ и $S = 1$ должен быть в несколько десятков раз больше начальных расщеплений между состояниями основного мультиплета $S = 2$. Теперь кратко обсудим экспериментальные результаты, полученные по моноклинным центрам. В ряде работ по центрам переходных ионов в кристаллах группы флюорита сообщалось (см., например, ссылки из монографии [8]), что моноклиная симметрия может реализоваться в случае локализации во второй и более далёких сферах окружения примесного иона двух точечных дефектов (междоузельных ионов фтора или ионов кислорода). Можно предположить, что в данном случае реализовалась именно такая ситуация. Но

вероятность одновременной локализации двух точечных дефектов вблизи одиночного примесного иона не может быть высокой; должны также образоваться ассоциаты примесного иона с одним междоузельным дефектом. Однако в исследуемых кристаллах такие ассоциаты не были обнаружены. Более вероятной нам кажется ситуация, когда вблизи иона Ni^{2+} в тетрагональной позиции локализуется междоузельный ион фтора. В таком случае 3F -терм иона никеля расщепится так, как это показано на рис. 6 (результат расчёта по точечной модели кристаллического поля). Основным окажется двукратно вырожденное орбитальное состояние. Согласно теории эффекта Яна-Теллера, такая система будет неустойчивой относительно смещений ближайших лигандов иона Ni^{2+} . Смещения лигандов в новые равновесные положения понизят симметрию образовавшегося центра до моноклиной (что и наблюдается в эксперименте).

Работа выполнена совместно с аспирантом Казанского государственного энергетического университета А. Д. Сираевым.

Литература

1. Бокий Г.Б.: Кристаллохимия. М.: Наука 1971. 400 с.
2. Крёгер Ф.: Химия несовершенных кристаллов. М.: Мир 1969. 524 с.
3. Казанский С.А., Рыскин А.И.: ФТТ **44**, 1356–1366 (2002)
4. Фазлижанов И.И., Уланов В.А., Зарипов М.М., Ерёмина Р.М.: ФТТ **44**, 1483–1486 (2002)
5. Уланов В.А., Зарипов М.М., Жеглов Е.П., Ерёмина Р.М.: ФТТ **45**, 71–75 (2003)
6. Уланов В.А., Зарипов М.М., Фазлижанов И.И.: ФТТ **47**, 1596–1601 (2005)
7. Alonso P.J., Casas Gonzalez J., den Hartog H.W., Alcala R.A.: J. Phys. C: Solid State Phys. **16**, 3593–3599 (1983)
8. Hayes W. (ed.): Crystals with the fluorite structure: electronic, vibrational and defect properties. Oxford: Clarendon Press 1974. 448 p.

Исследование структуры примесных центров трёхвалентного хрома в синтетическом форстерите методом перестраиваемой по частоте ЭПР-спектроскопии

А. А. Коновалов, В. Ф. Тарасов

Лаборатория радиоспектроскопии диэлектриков

Методом перестраиваемой по частоте ЭПР-спектроскопии показано, что в монокристаллах синтетического форстерита, легированного хромом, примесные ионы Cr^{3+} входят в позицию М1 кристаллической решётки синтетического форстерита (Mg_2SiO_4) в виде одиночных ионов и ассоциатов с другим некрамерсовым парамагнитным центром, природа которого пока не установлена.

Введение

В настоящее время в мире наблюдается большой интерес к проблемам квантовой информатики, в частности, к созданию квантовых компьютеров, которые позволят за приемлемое время решать задачи, недоступные для решения на классических компьютерах. Реализация квантовых алгоритмов вычислений возможна только на системах, состояниях и процессы в которых описываются законами квантовой механики. В частности, это могут быть парамагнитные центры, имеющие электронный спин $S = 1/2$. Один такой центр представляет один квантовый бит информации (кубит). Для реализации элементарных операций квантовых вычислений необходимо, по крайней мере, два кубита, связанных спин-спиновым взаимодействием. С этой точки зрения большой интерес представляют системы, в которых парамагнитные центры образуют устойчивые ассоциаты. Существуют несколько механизмов образования таких ассоциатов. Это могут быть, например, многоядерные кластеры в молекулярных кристаллах или примесные ионы во фторидах и оксидах металлов, для которых существуют механизмы, нарушающие статистическое распределение примесных ионов по кристаллу и способствующие образованию ассоциатов примесных ионов. Один из таких механизмов связан с необходимостью компенсации неравновесного катионного заряда при гетеровалентном замещении иона кристаллической решётки примесным ионом. Присутствие компенсатора заряда искажает регулярную кристаллическую решётку, что приводит к возрастанию внутренней энергии. В ряде случаев более выгодным оказывается образование ассоциатов примесных ионов, общий заряд которых равен заряду замещаемых ионов решётки. Например, ассоциат одно- и трёхвалентного ионов может замещать два двухвалентных иона. Возможна схема замещения, когда два трёхвалентных иона замещают три двухвалентных иона решётки с образованием одной вакансии. Обычно такая схема замещения реализуется, когда катионы решётки образуют квазиодномерную цепочку. Оба эти механизма реализуются при выращивании монокристаллов форстерита, легированного хромом.

Известно, что хром может входить в кристаллическую решётку форстерита в виде двух-, трёх- и четырёхвалентных ионов. Ион Cr^{4+} замещает Si^{4+} в тетраэдрически координированной позиции с зеркальной локальной симметрией кристаллического поля, а Cr^{3+} и Cr^{2+} замещают Mg^{2+} в двух кристаллографически различных октаэдрически координированных позициях с инверсионной и зеркальной локальной симметрией кристаллического поля, обозначаемых М1 и М2, соответственно.

Если говорить о трёхвалентном хrome в форстерите, то помимо одиночных ионов Cr^{3+} в позициях М1 и М2 с нелокальной компенсацией избыточного заряда [1], была обнаружена высокая концентрация ассоциатов, состоящих из двух ионов Cr^{3+} в позициях М1 и магниевой вакансии между ними, расположенных в квазиодномерной цепочке ионов Mg^{2+} , вытянутой вдоль кристаллографической оси с [2, 3]. В форстерите, солегированном хромом и алюминием, была обнаружена высокая концентрация ассоциатов $\text{Cr}^{3+}\text{-Al}^{3+}$, где Cr^{3+} замещает Mg^{2+} , а Al^{3+} замещает Cr^{4+} [4, 5]. В форстерите, солегированном хромом и литием, наблюдается большая концентрация ассоциатов $\text{Cr}^{3+}\text{-Li}^{+}$, где Cr^{3+} и Li^{+} замещает Mg^{2+} в соседних октаэдрических позициях [6]. К сожалению, ни один из указанных ассоциатов не может использоваться для реализации квантовых алгоритмов, поскольку Al^{3+} и Li^{+} имеют полностью заполненные электронные оболочки и оптически и магнитно неактивны, а ассоциат, описанный в [2, 3], состоит из одинаковых ионов и не допускает адресного обращения к отдельному иону.

Ион Cr^{3+} имеет спин $S = 3/2$, и в кристаллическом поле, симметрия которого ниже кубической, система спиновых уровней этого иона представляет два дублета (рис. 1). Расщепление между дублетами в нулевом магнитном поле Δ определяется параметрами кристаллического поля, и для Cr^{3+} в позиции М1 кристаллической решётки форстерита $\Delta > 60$ ГГц. Поэтому надёжным инструментом для идентификации структурно различных центров Cr^{3+} в позиции М1 кристаллической решётки форстерита является перестраиваемая по частоте высокочастотная ЭПР-спектроскопия [7], позволяющая регистрировать квартет междублетных резонансных

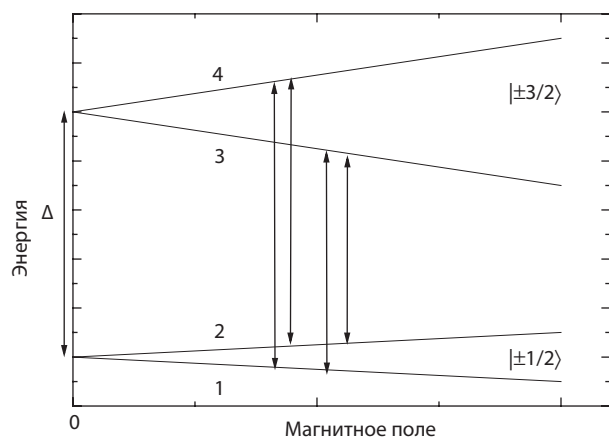


Рис. 1. Схема электронных уровней иона Cr^{3+} в кристаллическом поле аксиальной и более низкой симметрии (параметр эффективного спинового гамильтониана $D > 0$) для ориентации магнитного поля параллельно магнитной оси z .

переходов. Ранее нами было установлено, что для одиночного иона Cr^{3+} с нелокальной компенсацией величина $\Delta = 66.5$ ГГц [8], для ассоциата $\text{Cr}^{3+}\text{-Li}^+$ $\Delta = 67.5$ ГГц [9, 10]. Для ассоциата $\text{Cr}^{3+}\text{-Cr}^{3+}$ с магниевой вакансией наблюдалось большое количество резонансных переходов, среди которых можно выделить два квартета с $\Delta = 71.5$ и 73.0 ГГц, причём разница в величине Δ для этих квартетов определяется величиной спин-спинового взаимодействия [2].

При исследовании влияния примеси лития на относительное содержание различных центров хрома в форстерите методом обычной ЭПР-спектроскопии [11] был обнаружен ещё один центр. Концентрация этого центра была максимальной в образце, выращенном без примеси лития, и быстро спадала с ростом концентрации лития. Мы также наблюдали этот центр и определили, что для него $\Delta = 73.0$ ГГц [9]. Результаты исследований, направленных на выяснение природы данного центра, изложены в данной работе.

Результаты и обсуждение

Измерения проводились методом перестраиваемой по частоте ЭПР-спектроскопии в диапазоне 64–84 ГГц при температуре 4.2 К на образце № 507 из описанной в [9] серии образцов форстерита, легированного хромом и литием. При записи спектров использовалась ориентация вектора микроволнового магнитного поля $\mathbf{B}_1 \perp \mathbf{B}$. Образец имел форму кубика с размерами $3 \times 3 \times 3$ мм³ и был приготовлен в Центре лазерных материалов и технологий ИОФ РАН.

Для определения направлений главных магнитных осей центра была измерена ориентационная зависимость резонансных условий для перехода между уровнями 1 и 4 (см. рис. 1) при вращении магнитного поля в плоскостях bc и ab кристалла. Результаты представлены на рис. 2,

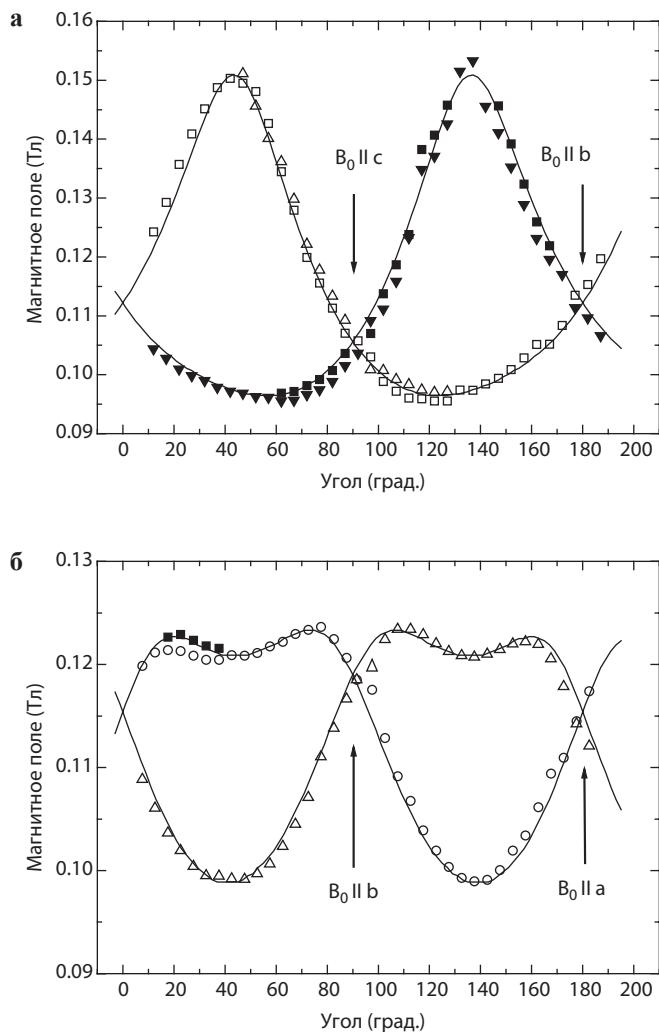


Рис. 2. Ориентационная зависимость резонансных полей перехода 1–4 иона Cr^{3+} в синтетическом форстерите: **а** в плоскости bc , частота микроволнового излучения 77.8 ГГц; **б** в плоскости ab , частота микроволнового излучения 78.1 ГГц.

где линии – расчёт с использованием эффективного спинового гамильтониана для $S = 3/2$

$$\mathcal{H} = \mu_B(g_x S_x B_x + g_y S_y B_y + g_z S_z B_z) + D \left(S_z^2 - \frac{1}{3} S(S+1) \right) + E(S_x^2 - S_y^2), \quad (1)$$

где подгоночными величинами при расчёте были значения g -факторов, параметр E и направления главных магнитных осей. Поскольку нами было прямо измерено расщепление в нулевом поле

$$\Delta = 2\sqrt{D^2 + 3E^2} = 73 \text{ ГГц}, \quad (2)$$

величина параметра D рассчитывалась с использованием выражения (2). Наилучшее описание экспериментальных данных было получено при значениях $E = 8.58$ ГГц, $D = 33.3$ ГГц, $g_x = 1.90$, $g_y = 1.91$, $g_z = 1.90$ и приведённых в таблице 1 направляющих косинусов главных магнит-

Таблица 1. Направляющие косинусы главных магнитных осей x , y , z относительно кристаллографических осей a , b , c .

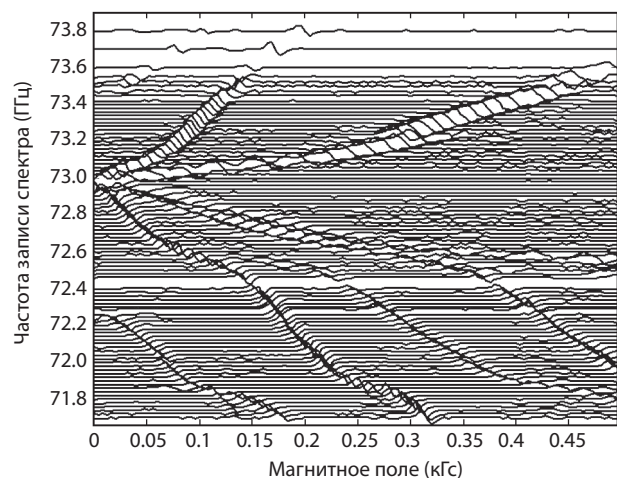
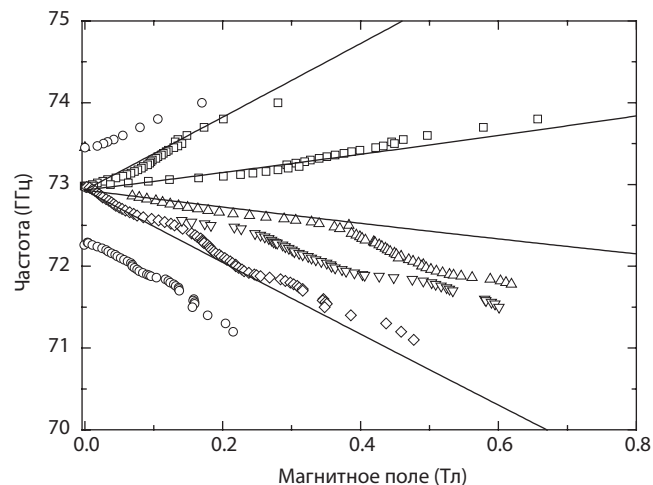
	a	b	c
x	0.5664	0.5272	-0.6334
y	-0.8115	0.4908	-0.3172
z	0.1436	0.6936	0.7059

ных осей одного из четырёх магнитно-неэквивалентных центров.

На рис. 2 видно, что расчётная ориентационная зависимость достаточно хорошо описывает экспериментальные результаты. Проблема состоит в том, что для уже известного одиночного иона Cr^{3+} с нелокальной компенсацией величина $\Delta = 66.5$ ГГц, а величина $\Delta = 73.0$ ГГц характерна для ассоциата Cr^{3+} - Cr^{3+} с магниевой вакансией. Однако в исследуемом образце отсутствует переход с $\Delta = 71.5$ ГГц. Это поставило под сомнение правильность интерпретации результатов измерений в [2]. Могло оказаться, что переходы с $\Delta = 73.0$ и 71.5 ГГц принадлежат двум разным центрам Cr^{3+} , а не одному ассоциату.

Для ответа на этот вопрос были проведены детальные исследования частотно-полевых зависимостей резонансных переходов в малых магнитных полях, в том числе в нулевом магнитном поле. На рис. 3 приведены экспериментальные спектры этого центра, а на рис. 4 – экспериментальные зависимости частоты переходов от магнитного поля и теоретические зависимости, рассчитанные для одиночного иона с использованием гамильтониана (1) и значений параметров, указанных выше. Видно, что экспериментально наблюдаемые частотно-полевые зависимости резонансных переходов не соответствуют зависимостям, рассчитанным в модели одиночного иона Cr^{3+} . Во-первых, число наблюдаемых переходов с $\Delta = 73.0$ ГГц больше четырёх. Во-вторых,

наблюдается сильная нелинейность экспериментальных частотно-полевых зависимостей. Наконец, наблюдаются два перехода с $\Delta = 73.5$ и 71.3 ГГц (кружки на рис. 4) между синглетными электронными состояниями. Это означает, что исследуемый нами центр является некрамерсовым центром с целым спином. Это может быть ассоциат иона Cr^{3+} , имеющего спин $S = 3/2$, с парамагнитным центром, имеющим спин $S = 1/2$ или $S = 3/2$. Причём, дополнительный центр должен располагаться в непосредственной близости к иону Cr^{3+} , так как для Cr^{3+} с нелокальной компенсацией величина $\Delta = 66.5$ ГГц. С другой стороны, высокая концентрация данных центров, существенно превышающая статистическую, показывает, что имеется причина, благоприятствующая образованию таких центров. Это может быть образование ассоциата, не требующего дополнительного компенсатора заряда, присутствие которого повышает внутреннюю энергию кристаллической решётки. При замещении ионом Cr^{3+} иона Mg^{2+} образуется дополнительный положительный заряд, который для сохранения электронейтральности кристалла должен быть скомпенсирован. В [2] предположено, что такую компенсацию обеспечивает вакансия Mg^{2+} в соседней позиции. Комплекс трёхвалентного хрома с магниевой вакансией имеет дефицит положительного заряда. В модели [2] этот дефицит покрывается другим ионом Cr^{3+} в такой же позиции M1. В рассматриваемом нами случае система электронных уровней отличается от [2]. Соответственно, другая должна быть и структура примесного центра. Мы рассмотрели две возможных структуры. Первая представляет ион Cr^{3+} в позиции M1 и магниевую вакансию в соседней позиции M1, а второй ион Cr^{3+} замещает Mg^{2+} в близлежащей позиции M2. Полный спин такого центра $S = 3$. Вторая рассмотренная структура также представляет ион Cr^{3+} и магниевую вакансию, а необходимый дефицит положительного заряда компенсируется дыркой на одном из

**Рис. 3.** Экспериментальные спектры иона Cr^{3+} ($\Delta = 73$ ГГц) в малых магнитных полях. Цифры слева соответствуют частоте микроволнового излучения.**Рис. 4.** Частотно-полевые зависимости резонансных переходов иона Cr^{3+} ($\Delta = 73$ ГГц) в малых магнитных полях. Линии – расчёт с использованием эффективного спинового гамильтониана (1) при значениях параметров, указанных в тексте.

ионов кислорода. Спин дырки $S = 1/2$, поэтому полный спин ассоциата может быть равен 1 или 2, в зависимости от характера взаимодействия между ионом Cr^{3+} и дыркой на кислороде. К сожалению, к настоящему времени нам не удалось сделать однозначный выбор между этими возможными структурами. Ответ может быть получен при исследовании кристаллов форстерита, легированного изотопом ^{53}Cr , имеющим ядерный спин $I = 3/2$. Тогда по сверхтонкой структуре спектров данного центра можно однозначно определить число ионов Cr^{3+} , образующих данный ассоциат.

Выводы

Методом перестраиваемой по частоте ЭПР-спектроскопии исследованы ориентационные и частотно-полевые зависимости резонансных переходов примесного центра Cr^{3+} с начальным расщеплением в нулевом поле 73 ГГц. Показано, что данный центр является ассоциатом иона Cr^{3+} , замещающего ион Mg^{2+} в кристаллографической позиции M1, с другим крамеровским парамагнитным центром. Предположительно, это может быть ион Cr^{3+} в позиции M2 или дырка на близлежащем ионе кислорода.

Работа выполнена в сотрудничестве с Е. В. Жариковым (ИОФ им. А. М. Прохорова РАН, РХТУ им. Д. И. Менделеева) и В. Б. Дудниковой (Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского РАН) и

частично поддержана грантом РФФИ (№ 09-07-97006) и грантом Президента РФ “Ведущие научные школы” (НШ-02.513.11.0039).

Литература

1. Rager H.: Phys. Chem. Minerals **1**, 371–378 (1977)
2. Shakurov G.S., Tarasov V.F.: Appl. Magn. Reson. **21**, 597–605 (2001)
3. Тарасов В.Ф., Шакуров Г.С.: Высоочастотная ЭПР-спектроскопия пар Cr^{3+} - Cr^{3+} в синтетическом форстерите. Казанский физико-технический институт имени Е. К. Завойского 2001. Ежегодник, с. 80–83. Казань: ФизтехПресс 2002.
4. Бершов Л.В., Минеева Р. М., Сперанский А.В., Хафнер С.: ДАН **260**, 191–194 (1981)
5. Bershov L.V., Gaite J.-M., Hafner S.S., Rager H.: Phys. Chem. Minerals **9**, 95–101 (1983)
6. Лебедев В.Ф., Рябов И.Д., Гайстер А.В., Подставкин А.С., Жариков Е.В., Шестаков А.В.: ФТТ **47**, 1447–1449 (2005)
7. Shakurov G.S., Tarasov V.F.: Appl. Magn. Reson. **2**, no. 3, 571–576 (1991)
8. Тарасов В.Ф., Шакуров Г.С., Гавриленко А.Н.: ФТТ **37**, 499–504 (1995)
9. Коновалов А.А., Тарасов В.Ф., Дудникова В.Б., Жариков Е.В.: ФТТ **51**, 1533–1540 (2009)
10. Коновалов А.А., Тарасов В.Ф.: Двух- и трёхвалентный хром в форстерите по данным высоочастотной ЭПР-спектроскопии. Казанский физико-технический институт имени Е. К. Завойского 2008. Ежегодник, с. 99–102. Казань: ФизтехПресс 2009.
11. Ryabov I.D., Gaister A.V., Zharikov E.V.: Abstr. of the Int. Conf. “Modern Development of Magnetic Resonance-2004”, p. 157–158. Kazan: Zavoisky Physical-Technical Institute 2004.

ЭПР-исследование спин-переходных процессов в трис-дитиокарбаматах Fe(III)

Т. А. Иванова, О. А. Туранова, И. В. Овчинников

Лаборатория молекулярной радиоспектроскопии

Изучена температурная зависимость спектров ЭПР ряда дитиокарбаматов $\text{Fe}(\text{RR}'\text{dte})_3$ в интервале температур 5–300 К. Возможность наблюдения ЭПР ионов Fe(III) во всём температурном диапазоне обеспечивалась небольшой долей сольватированных комплексов, выступающих в роли спиновых зондов в несигнализирующей матрице. Спиновый переход проявлялся как в уменьшении интегральной интенсивности сигнала от высокоспиновых комплексов, так и в его уширении с понижением температуры из-за влияния низкоспиновых комплексов с короткими временами спин-решёточной релаксации. При температурах ниже ~60 К обнаружено ферромагнитное упорядочение магнитных моментов в возникших при спиновом переходе низкоспиновых частицах (“доменах”).

Введение

Трис-дитиокарбаматы Fe(III) были первыми соединениями, в которых обнаружено явление спинового перехода (СП) [1, 2]. Интенсивное изучение этого класса соединений различными методами показало, что магнитные свойства трис-дитиокарбаматов $\text{Fe}(\text{RR}'\text{dte})_3$ весьма разнообразны и высоко чувствительны к заместителям R, R' и сольватирующим агентам [3]. В соединениях этого типа, по данным измерений магнитной восприимчивости, часто имеет место термически активированный переход высокий спин (BC) $\leftrightarrow$ низкий спин (HC). Однако число работ по изучению ЭПР в этом классе соединений невелико, причём встречаются противоречивые заключения о возможности наблюдения ЭПР и природе наблюдаемых сигналов [4, 5]. По мнению ряда авторов, трудности наблюдения и интерпретации спектров ЭПР связаны, скорее всего, с быстрой спин-решёточной релаксацией [6]. Дополнительные проблемы могут возникать и в том случае, когда скорость интерконверсии оказывается больше частоты измерения в ЭПР-спектроскопии ($\sim 10^{10} \text{ с}^{-1}$ для X-диапазона).

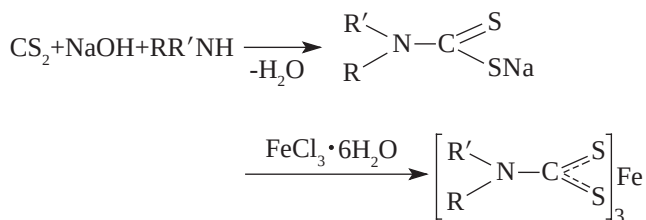
Проведённый нами анализ литературных данных [4–8] показывает, что надёжному наблюдению сигналов ЭПР в дитиокарбаматах (ДТК) способствует сольватация комплексов. Поэтому мы использовали в своих исследованиях соединения с малой степенью сольватации, рассматривая эти отдельные сольватированные комплексы (их количество, как будет показано ниже, не превышало ~2% от общего количества комплексов Fe(III)) как парамагнитные зонды, обеспечивающие возможность уверенного детектирования сигналов ЭПР в том случае, когда для “чистых” комплексов наблюдение сигнала затруднено из-за коротких времён спин-решёточной релаксации и большой скорости интерконверсии. Задача настоящего исследования состояла в детальном изучении ЭПР некоторых ДТК $\text{Fe}(\text{RR}'\text{dte})_3$ в широком температурном

диапазоне с целью выяснения особенностей СП в этом классе соединений.

Объекты исследования

Нами синтезированы комплексы $\text{Fe}(\text{RR}'\text{dte})_3$ со следующими заместителями: **I**) $\text{R}=\text{R}'=\text{CH}_3$, **II**) $\text{R}=\text{R}'=\text{C}_2\text{H}_5$, **III**) $\text{R}=\text{CH}_3$, $\text{R}'=\text{C}_6\text{H}_5$, **IV**) $\text{RR}'=\text{C}_4\text{H}_8\text{O}$.

Комплексы Fe(III) получали двустадийным методом:



В качестве сольватирующего агента использовался хлороформ. Мы не предпринимали никаких жёстких мер для полного удаления сольватированного в процессе получения комплексов растворителя. Сушка проводилась при комнатной температуре. Это позволило получать в синтезированных соединениях небольшое остаточное количество (<2%) сольватированных комплексов. Состав и структура полученных соединений подтверждалась методами элементного анализа, ИК, ^1H ЯМР, электронной спектроскопией.

Методом медленного испарения растворителя был выращен также монокристалл состава **II** (образец **IIa**), для которого идентификация структуры выполнена на основании рентгеноструктурных измерений. По данным рентгеноструктурного анализа структура монокристаллов имеет пространственную группу $\text{P2}_1/\text{c}$ и идентична описанной в литературе для данного вида соединений [9].

Результаты

Отличительной особенностью сигналов ионов Fe(III) в исследуемых ДТК является их малая интенсивность. Как показали оценки абсолютной интенсивности сигналов ЭПР (при использовании в качестве эталона кристалла BaMnF_4), интегральная интенсивность сигналов колеблется в пределах $0.2 \div 2\%$ от ожидаемой для введённого количества железа для разных составов и различных синтезов. Это позволяет заключить, что ЭПР от основной части комплексов Fe(III) не наблюдается. Однако, как отмечалось выше, при используемой нами методике синтеза поликристаллических образцов на стадии удаления сольвата в матрице остаётся небольшое количество сольватированных комплексов, сигналы от которых детектируются во всём интервале температур, играя роль парамагнитных зондов. В монокристаллическом образце **IIa** сигнал ЭПР не наблюдался во всём температурном интервале вплоть до 5 K ни в X-, ни в W-диапазоне, что подтверждает высказанное утверждение.

В спектрах поликристаллических образцов **I–IV** при комнатной температуре в X-диапазоне наблюдаются сигналы ЭПР двух типов: сигнал A в слабых магнитных полях с $g_{\text{эфф}} \sim 4.3$ и шириной $\Delta H_{\text{эфф}}$ до нескольких сотен эрстед (от пика до пика) и сигнал B с $g_{\text{эфф}} \sim 2$, по форме близкий к симметричному, с $\Delta H_{\text{эфф}} \sim 300\text{--}400$ Э.

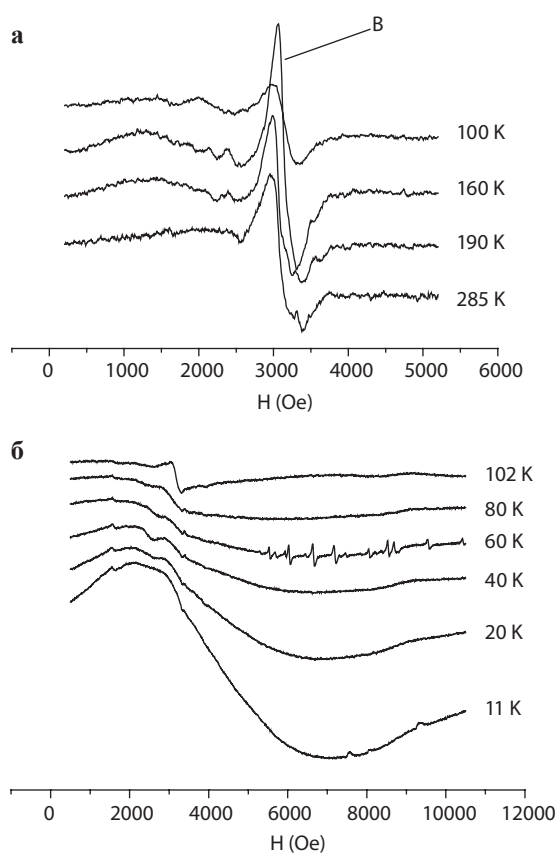


Рис. 1. Температурная зависимость спектров ЭПР образца **I** при $T \geq 100$ K (**а**) и $T < 100$ K (**б**), $\nu = 9.43$ ГГц.

На рис. 1, 2 приведены характерные температурные зависимости сигналов ЭПР некоторых образцов в разных температурных диапазонах. В образцах **I** и **IV** в интервале 100–300 K наблюдался только сигнал B, в образце **III** – оба сигнала одновременно. В поликристаллическом образце **II** при комнатной температуре сигнал практически отсутствовал. В образцах различного состава не сохраняется соотношение интенсивностей сигналов A и B при их примерно одинаковых параметрах, что указывает на их принадлежность двум различным типам центров.

Сигналы типа A принадлежат ВС-комплексам Fe(III), для которых выполняется условие сильных кристаллических полей $D > h\nu$ и характерны сильные ромбические искажения $E/D \sim 1/3$ [10, 11]. Интегральная интенсивность сигнала увеличивается с понижением температуры примерно в соответствии с законом Кюри (пропорционально $1/T$), что позволяет утверждать, что эти комплексы не испытывают СП.

Для сигналов типа B ни в одном из исследованных нами соединений при понижении температуры вплоть до ~5 K сигнал не трансформировался в спектр, характерный для парамагнитных центров с $S = 1/2$, который можно было бы приписать НС-комплексам. Такая трансформация спектра в области $g \sim 2$ наблюдалась, например, для других соединений Fe(III) с СП в [12, 13] и сопровождалась уменьшением ширины индивидуальной линии.

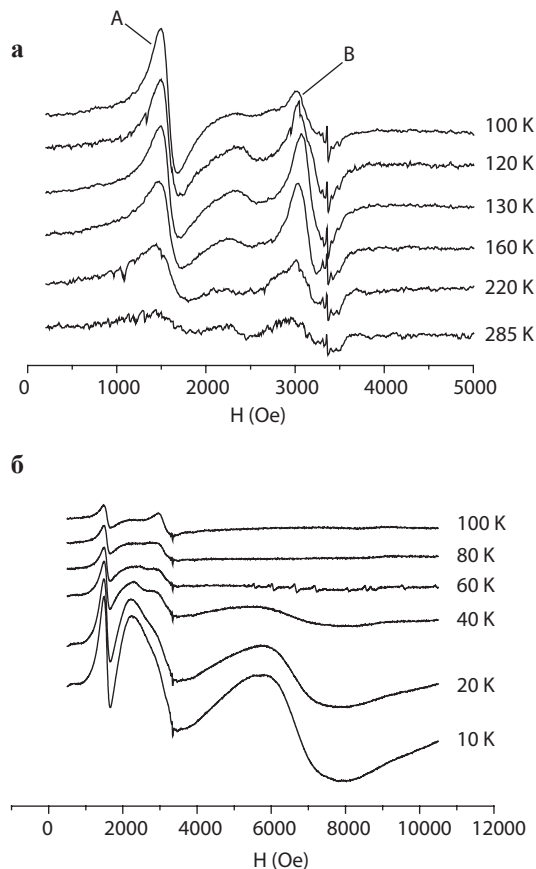


Рис. 2. Температурная зависимость спектров ЭПР образца **III** при $T \geq 100$ K (**а**) и $T \leq 100$ K (**б**), $\nu = 9.43$ ГГц.

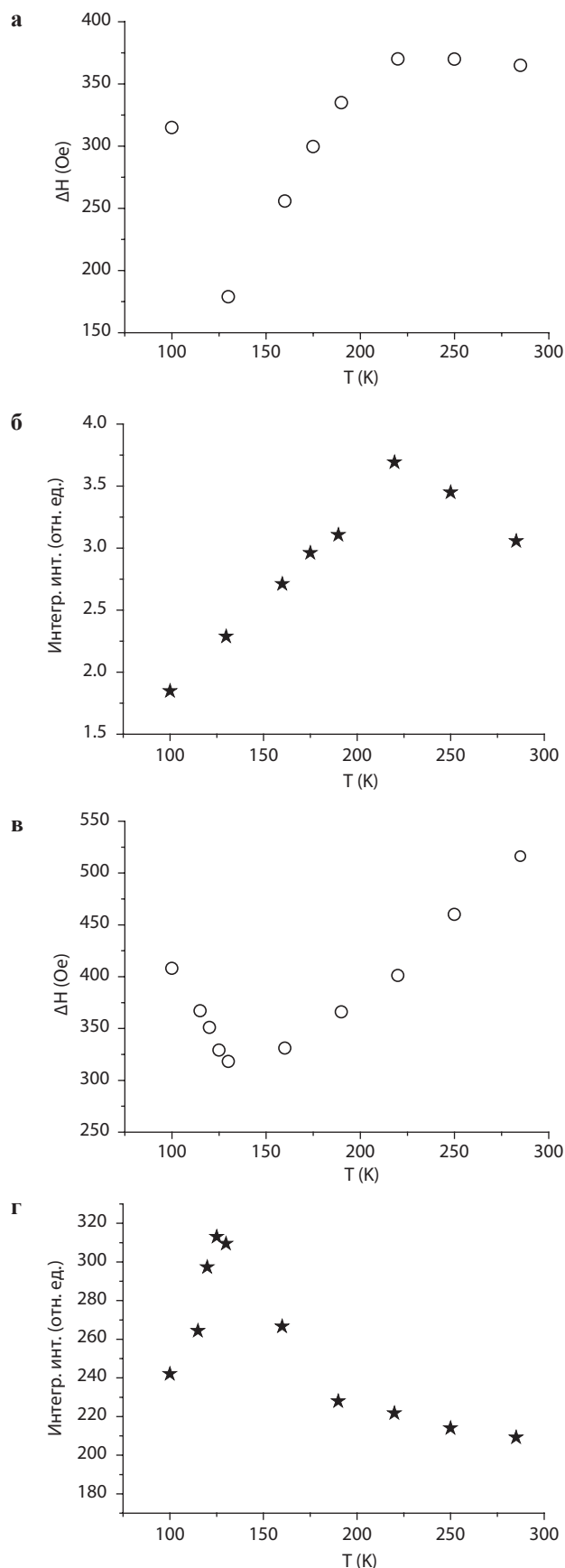


Рис. 3. Температурные зависимости ширины линии (○) и интегральной интенсивности (★) сигналов В: образец I (а, б); образец III (в, г).

Более того, в нашем случае после некоторого сужения линии при понижении температуры наблюдается уширение сигнала В, достигающее при $T \sim 60\text{--}80$ К величин до нескольких тысяч эрстед (рис. 1, 2). Температурная зависимость интегральной интенсивности сигнала В и его ширины ΔH (от пика до пика) имеют немонотонный характер (рис. 3). Наличие интервала температур, в котором интегральная интенсивность уменьшается с понижением температуры, позволяет отнести сигнал В к ВС-комплексам Fe(III), испытывающим СП. Наблюдаемая форма линии объясняется тем, что для ВС-комплексов Fe(III) $D \ll h\nu$ компоненты тонкой структуры сглажены из-за достаточно большой ширины индивидуальной линии. Для образца III, в котором присутствуют комплексы обоих типов, при понижении температуры менялась относительная интенсивность сигналов А и В (рис. 2а). В этом случае можно говорить о частичном СП, в котором участвуют только комплексы В типа.

При температурах, более низких, чем ~ 60 К, в спектрах возникали и усиливались с понижением температуры широкие асимметричные линии в интервале магнитных полей до ~ 10 тысяч эрстед (рис. 1б, 2б). Форма этих линий различна для образцов с различными заместителями. Кроме того, она не соответствует существующим представлениям о форме и параметрах спектра индивидуальных НС-комплексов, какими должны бы стать при низких температурах сольватированные комплексы Fe(III), играющие роль парамагнитных меток. Мы полагаем, что такая трансформация спектра обусловлена существованием в исследуемых образцах при низких температурах некоторых ферромагнитных включений.

Измерения магнитной восприимчивости показали, что в изученных образцах действительно наблюдается плавный СП в диапазоне температур 4.2–300 К. Примеры температурной зависимости величины $\mu_{\text{эфф}}$ (для образцов I и IV) приведены на рис. 4. Видно, что в образце IV СП смещён в сторону более низких температур и для него характерны большие значения остаточного содержания ВС-фракции при низких температурах. Следует отметить,

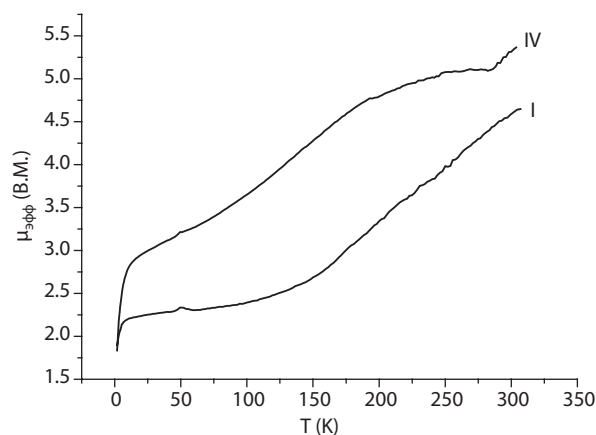


Рис. 4. Температурная зависимость магнитной восприимчивости образцов I и IV.

что данные магнитной восприимчивости отражают участие всех комплексов Fe(III) в спин-переходном процессе (в основном, ненаблюдаемых в ЭПР). Как показано выше, парамагнитные зонды, какими являются сольватированные комплексы Fe(III), также вовлечены в этот процесс, то есть адекватно передают свойства матрицы. Однако параметры СП для них могут несколько отличаться от параметров, полученных из измерений магнитной восприимчивости.

Обсуждение результатов

По данным измерений абсолютной концентрации число парамагнитных центров Fe(III), дающих вклад в наблюдаемый сигнал ЭПР, существенно меньше, чем количество введенных ионов Fe(III). Учитывая то обстоятельство, что в “чистом” монокристаллическом образце **IIa** сигнал ЭПР не наблюдался, можно утверждать, что в образцах **I**, **III-IV** наблюдаются сигналы только от сольватированных комплексов. Наблюдение двух типов ВС-комплексов в образце **III** может быть связано с двумя различными позициями сольватирующего агента.

Отсутствие сигналов от несольватированных НС-комплексов связано с короткими временами спин-решёточной релаксации. Для НС-комплексов короткие временами спин-решёточной релаксации обусловлены наличием значительного вклада орбитального момента в состояния НС-терма 2T_2 [14]. Кроме того, в соответствии с рентгеноструктурными данными для НС-комплексов характерны не только меньшие величины расстояний металл-лиганд по сравнению с ВС, что обеспечивает более сильное кристаллическое поле, но и более высокая симметрия: в тригонально искажённом октаэдре FeS₆ угол разворота между верхним и нижним треугольниками и углы лиганд-металл-лиганд приближаются к их значениям в правильном октаэдре [9, 15–18]. Поэтому можно говорить о дополнительном факторе, укорачивающем время релаксации НС-комплексов Fe(III) как о причине ненаблюдаемости их спектров ЭПР. Для ВС-комплексов вклад орбитального момента в состояние 6A_1 подавлен, и ожидаются более длинные времена спин-решёточной релаксации по сравнению с НС-комплексам. Однако при комнатных температурах (~300 К), когда число несольватированных ВС-комплексов (по данным магнитной восприимчивости) составляет не менее 60%, мы не наблюдаем сигналов, соответствующих по интенсивности этому количеству парамагнитных центров. Поэтому мы можем утверждать, что для ВС несольватированных комплексов время спин-решёточной релаксации остаётся достаточно коротким и/или скорость интерконверсии между ВС и ненаблюдаемыми НС-состояниями больше частоты наблюдения ЭПР ($>10^{10}$ с⁻¹).

Сольватация комплекса приводит, по-видимому, к уменьшению частоты перескоков между ВС и НС-состояниями до величин, меньших 10^{10} с⁻¹, из-за увеличения потенциального барьера между ними. В результате

сольватированные ВС-комплексы становятся наблюдаемыми в верхнем температурном пределе СП (при отсутствии или малом количестве в матрице НС-комплексов).

При понижении температуры, с одной стороны, согласно больцмановскому закону распределения, увеличивается заселённость основного ВС-состояния, с другой стороны – в результате СП уменьшается количество ВС-комплексов. Конкуренция этих двух процессов и является причиной немонотонного изменения интегральной интенсивности наблюдаемого сигнала ЭПР от ВС-комплексов (рис. 3б, г).

Особенности поведения ширины линии ΔH с изменением температуры также связаны с процессами СП. Уменьшение величины ΔH при понижении температуры от 300 до ~130 К обусловлено, скорее всего, уменьшением вклада от релаксационного уширения. Вместе с тем, спин-спиновое взаимодействие ВС сольватированных комплексов с НС-комплексам, не наблюдаемыми из-за коротких времён спин-решёточной релаксации, приводит к уменьшению эффективного времени спин-решёточной релаксации сигнала В. Механизм влияния флуктуирующего дипольного поля соседних ионов с быстрой релаксацией, на ширину линии ионов с более длинными временами спин-решёточной релаксации описан в [19]. В рамках этого механизма уширение сигналов типа В с понижением температуры объясняется увеличением времени спин-решёточной релаксации НС-комплексов. В диапазоне температур 130–60 К этот механизм становится преобладающим.

При дальнейшем развитии СП (при температурах ниже ~60 К) в образце увеличивается относительное содержание НС сольватированных центров. Однако вместо ожидаемых сигналов ЭПР, соответствующих форме линии спектров с $S = 1/2$, наблюдается широкие анизотропные линии. Их интенсивность увеличивается с понижением температуры, а форма линии существенно различна для образцов разных составов. Это не позволяет приписать их индивидуальным НС сольватированным центрам, для которых релаксационное уширение остаётся достаточно большим. Тем более, что мы не наблюдаем улучшения степени разрешения спектра при понижении температуры от 40 до 5 К, указывающего на уменьшение релаксационного вклада в ширину линии из-за увеличения времени спин-решёточной релаксации. Мы полагаем, что описанные сигналы это линии магнитного резонанса от НС сольватированных комплексов, находящихся в магнитном поле, создаваемом ферромагнитно упорядоченными магнитными моментами кластеров, состоящих из НС несольватированных комплексов. Такими кластерами являются образующиеся в высокоспиновой фракции низкоспиновые “домены” (под доменами в теории спиновых переходов понимают скопления частиц одного сорта среди частиц другого сорта). Нужно отметить, что доменная модель является одной из часто реализуемых в твёрдых телах моделей спинового перехода [12, 20, 21]. Предположение о том, что в НС-доменах имеет место ферромагнитное упорядочение магнитных моментов, по-

звляет объяснить наблюдаемые при низких температурах особенности спектров. Как известно, форма сигнала магнитного поглощения существенно зависит от конфигурации ферромагнитной частицы [22]. Для лигандов с различными заместителями вряд ли можно ожидать, что НС-домены будут иметь одинаковую конфигурацию. Видимо, с этим связано различие наблюдаемых спектров для разных образцов. НС-домены по сути являются суперпарамагнитными частицами и ориентированы в объёме образца хаотически, поэтому ферромагнитное упорядочение внутри частиц никак не проявляется на ходе температурной зависимости $\mu_{\text{эфф}}$.

Авторы благодарят сотрудников Института молекулярной физики ПАН (г. Познань, Польша) Б. Анджеевского и М. Аугустиняка-Яблоков за проведение измерений магнитной восприимчивости и сотрудника КГУ А. А. Родионова за помощь в проведении измерений ЭПР.

Литература

1. Cambi L., Cagnasso A.: Atti. Accad. Naz. Lincei **13**, 809–813 (1931)
2. Cambi L., Szego L.: Ber. Deut. Chem. Ges. **64**, 2591 (1931)
3. Van Koningsbruggen P.J., Maeda Y., Oshio H.: Top. Curr. Chem. **233**, 259–324 (2004)
4. Flick C., Gelerinter E.: Chem. Phys. Lett. **23**, 422–424 (1973)
5. Hall G.R., Hendrickson D.N.: Inorg. Chem. **15**, no. 3, 607–618 (1976)
6. Pandeya K.B., Singh R.: Inorg. Chim. Acta **147**, 5–7 (1988)
7. Garif'yanov N.S., Kamenev S.S., Kozyrev B.M., Ovchinnikov I.V.: Dokl. Acad. Nauk SSSR **177**, 880 (1967)
8. Gelerinter E., Stefanov M.E., Lockhart T.E., Rininger D.P., Duffy N.V.: J. Inorg. Nucl. Chem. **42**, 1137–1139 (1980)
9. Leipoldt J.G., Coppens P.: Inorg. Chem. **12**, 2269–2274 (1973)
10. Wickman H.H., Klein M.P., Shirley D.A.: J. Chem. Phys. **42**, 2113–2117 (1965)
11. Aasa R.: J. Chem. Phys. **52**, 3919–3930 (1970)
12. Иванов Т.А., Овчинников И.В., Туранов А.Н.: ФТТ **49**, 2033–2038 (2007)
13. Conti A.J., Chadha R.K., Sena K.M., Rhengold A.L., Hendrickson D.N.: Inorg. Chem. **32**, no. 12, 2670–2680 (1993)
14. Альтшулер С.А., Козырев Б.М.: Электронный парамагнитный резонанс. М.: Наука 1961. 368 с.
15. Albertsson J., Oskarsson A., Stahl K., Svensson C., Ymen I.: Acta Cryst. B **37**, 50–56 (1981)
16. Albertsson J., Oskarsson A.: Acta Cryst. B **33**, 1871–1877 (1977)
17. Stahl K.: Acta Cryst. B **39**, 612–620 (1983)
18. Healy P.C., White A.H.: J. Chem. Soc., Dalton Trans. 1163–1171 (1972)
19. Абрагам А., Блيني Б.: Электронный парамагнитный резонанс переходных ионов, т. 1, с. 596. М.: Мир 1972.
20. Zelentsov V.V., Yablokov Yu.V., Augustyniak-Jablokow M.A., Krupska A., Mrozinski J., Ulanov V.A.: Chem. Phys. **301**, 15–26 (2004)
21. Cantin C., Kliava J., Marbeuf A., Mikailitchenko D.: Eur. Phys. J. B **12**, 525–540 (1999)
22. Гуревич А.Г.: Магнитный резонанс в ферритах и антиферромагнетиках. М.: Наука 1973. 592 с.

Температурные зависимости параметров спектров ЭПР спин-переходных комплексов Fe(III) в ионообменном полимере

Г. П. Вишневецкая, И. В. Овчинников, Е. Н. Фролова

Лаборатория молекулярной радиоспектроскопии

Впервые методом ЭПР наблюдаются и исследованы особенности спин-переходных процессов между высокоспиновыми (ВС) и низкоспиновыми (НС) комплексами железа (III) с гетарилформазанами, иммобилизованными на ионообменном полимере. Анализ полностью обратимых температурных зависимостей положений, ширины линий и интегральных интенсивностей спектров ЭПР ВС- и НС-комплексов позволил выделить температурные интервалы, соответствующие подготовительному периоду для осуществления спин-переходных процессов, их появлению и реализации. В подготовительном к спин-переходному процессу периоде (450–260 К) происходит перераспределение ВС- и НС-комплексов и/или их состояний в отдельных порах, вызывающее увеличение локальных концентраций каждого из типов комплексов без изменения их общего содержания. При $T < 325$ К проявляется также стабилизация конформационных искажений ВС-комплексов, которые усреднялись при более высоких температурах. При $T \leq 250$ К начинается непосредственно процесс спинового перехода (спин-кроссовер), сопровождающийся увеличением внутреннего давления в системе. Произведены оценки величин локальных концентраций и частот спинового обмена в кластерах. Для ВС-комплексов наблюдаются эффекты, связанные со сдвигом их сигнала ЭПР в процессе изменения температуры и продолжительностью хранения образцов. Отмечен факт очень высокой чувствительности ВС-комплексов (в противоположность высокой устойчивости НС-комплексов) к внешним воздействиям. Специфика экспериментальных фактов, наблюдаемых методом ЭПР в ионообменном полимере, свидетельствует, что лишь по достижении критических размеров зародышей (доменов) возможно дальнейшее осуществление спиновых переходов, т.е. удовлетворяет концепции зарождения и роста доменов в спин-переходном процессе.

Введение

Высокоспиновые (ВС) или низкоспиновые (НС) состояния образуются в соединениях, содержащих $3d^4$ – $3d^7$ ионы, в тех случаях, когда энергия расщепления в поле лигандов кубической симметрии меньше или больше среднего значения энергии спаривания спинов.

Для иона Fe(III) обычно реализуется ВС-состояние с величиной спина $S = 5/2$ или НС-состояние с величиной спина $S = 1/2$. Когда две энергии (расщепления и спаривания) сравнимы между собой и с тепловой энергией kT , в системе могут происходить $ВС \leftrightarrow НС$ спиновые переходы.

Спиновое состояние системы зависит от состава металлокомплекса, от природы матрицы, в которой находится этот комплекс (например, твердое тело, полимер, жидкий кристалл, раствор), от действия внешних факторов (температура, давление, сольватация и др.) [1–5]. Спин-переходные системы могут с успехом использоваться, например, в молекулярной электронике [2], играют большую роль в биологических процессах [6].

Наибольшее количество работ по спин-переходным системам выполнено на твердотельных поликристаллических образцах. Исследования нашей лаборатории на жидкокристаллических и твердотельных образцах представлены в Ежегодниках КФТИ за 2005–2008 г.

Для понимания особенностей спин-переходных явлений, связанных с ростом одной фракции в другой, были предложены модели с однородным распределением

ВС- и НС-комплексов и доменная [7]. В настоящее время более предпочтительной является модель доменов, представляющих собой ограниченные по размеру области, в которых концентрируются ВС- или НС-комплексы. Термодинамическая модель образования и роста ВС- и НС-доменов, позволила объяснить многие особенности спиновых преобразований [1, 3–5].

В данной работе мы представляем результаты по исследованию методом ЭПР спин-переходных явлений, впервые наблюдаемых в содержащем Fe(III) ионообменном полимере АН-18-10П.

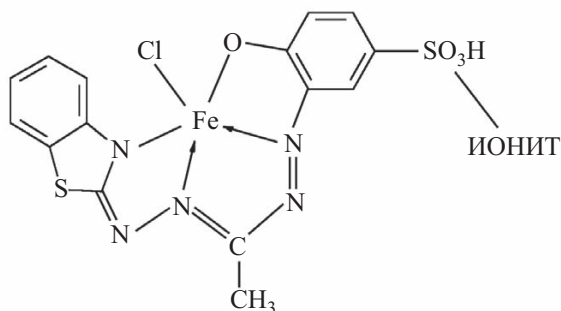
Особенности объектов исследования

Гетероциклические формазаны характеризуются высокой гибкостью молекулы в координации с металлами, конформационной лабильностью при изменении внешних воздействий, способностью к стабилизации при определенных условиях различных таутомерных форм лигандов [8].

Для увеличения концентрации сорбируемых комплексов в данной работе в качестве полимерной матрицы использовали растертый пористый анионит АН-18-10П с большими размерами пор и с высокой концентрацией активных группировок, способных к ионному обмену.

Синтезированный комплекс Fe(III) с гетарилформазаном закреплялся на полимерном носителе. На основании данных элементного анализа, масс- и ИК-спектроскопии в

полимерной матрице формировалась структура, имеющая состав $\text{Fe:L} = 1:1$.



Шестое координационное место могло быть занято молекулами растворителя. Установлено, что активные группировки самого ионита при использованных значениях pH среды участия в комплексообразовании с Fe(III) не принимали.

Методом ЭПР исследовались образцы как свежеприготовленные, так и выдержанные от двух месяцев до года (условно назовем их “свежими” и “выдержанными” образцами).

Экспериментальные результаты

Исследованные нами системы предоставляют возможность одновременного наблюдения сигналов ЭПР как от ВС- так и НС-комплексов (рис. 1, 2), что встречается достаточно редко.

Для НС-комплексов наблюдается анизотропный сигнал ЭПР, характерный для аксиального искажения локальной симметрии комплекса с $g_{\perp} = 2.120 \pm 0.005$ и $g_{\parallel} = 1.975 \pm 0.005$. Структура НС-комплексов является очень устойчивой, т.к. значения $g_{\parallel}$ и $g_{\perp}$, характеризующие сигнал ЭПР этих комплексов, не изменяются во всем изученном диапазоне температур (450–100 K) и при различных сроках хранения образцов.

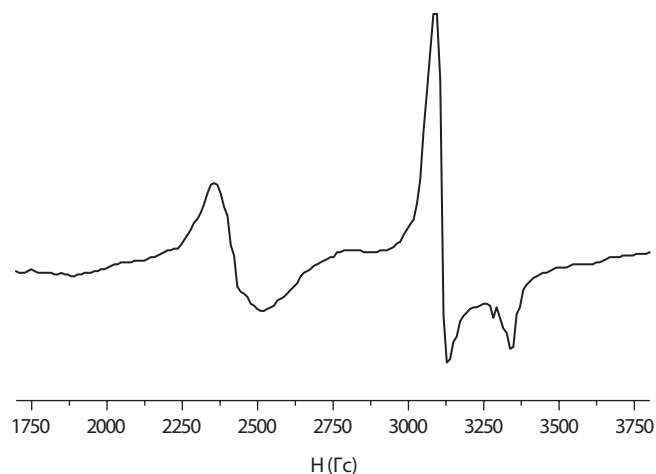


Рис. 1. Спектр ЭПР комплекса Fe(III) с гетарилформазаном, иммобилизованного на ионите, при 295 K (свежеприготовленный образец).

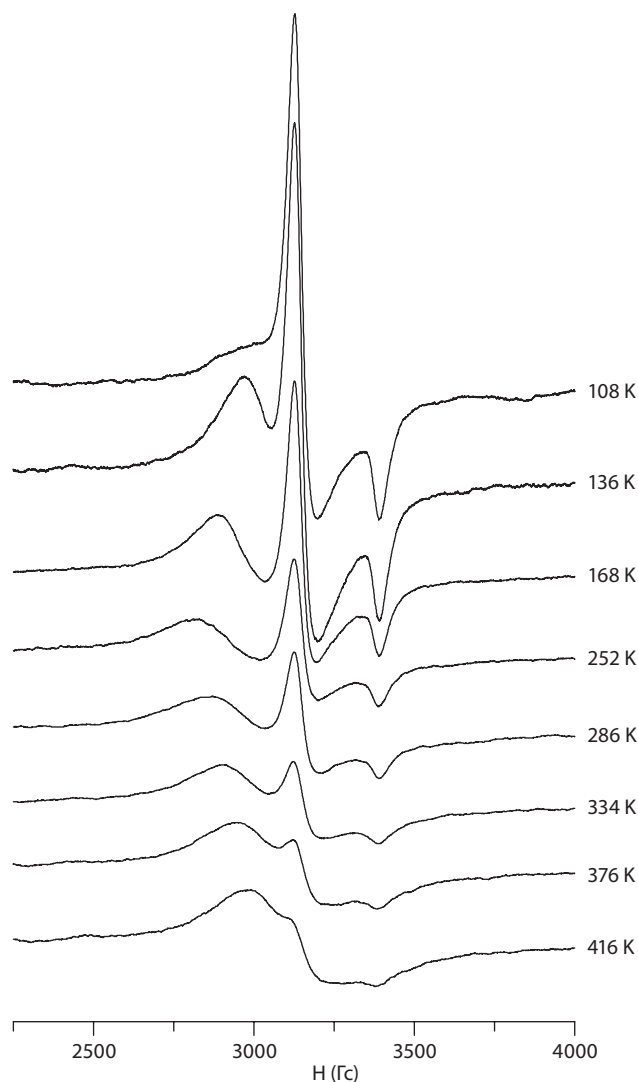


Рис. 2. Спектры ЭПР комплекса Fe(III) с гетарилформазаном, иммобилизованного на ионите (выдержанный образец) при различных температурах.

Экспериментальные спектры ЭПР ВС-комплексов согласуются с теоретическими при условии сильных кристаллических полей ($D \gg h\nu$) и с учётом аксиальных (D) и ромбических (E) компонент тонкой структуры. Расчёты проводились для спин-гамильтониана, записанного в единицах $\lambda = E/D$ [9]:

$$\mathcal{H} = [S_z^2 - 1/3S(S+1)] + \lambda(S_x^2 - S_y^2). \quad (1)$$

Структура ВС-комплексов по сравнению со структурой НС-комплексов является более лабильной. Например, для свежеприготовленных образцов при 295 K $g_{\text{эф}} = 2.750 \pm 0.005$, $\lambda = 0.14 \pm 0.05$, а для выдержанных в течении длительного времени образцов $g_{\text{эф}} = 2.270 \pm 0.005$, $\lambda = 0.12 \pm 0.05$. Изменяется она также при изменении температуры и влагосодержания. Отметим, что в процессах нагревание $\leftrightarrow$ охлаждение температурные зависимости интегральных интенсивностей спектров ЭПР (рис. 3),

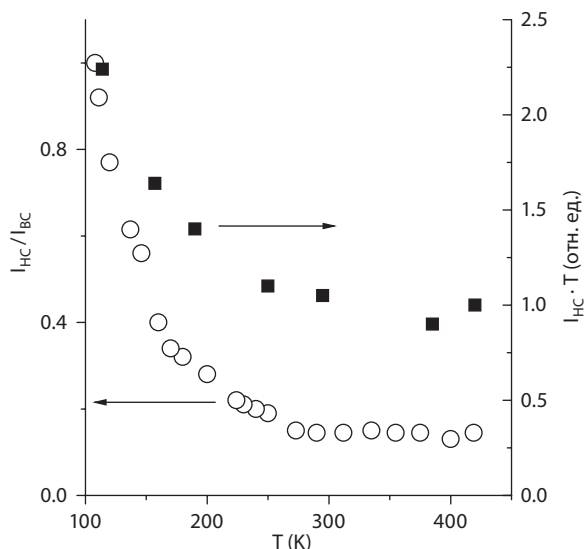


Рис. 3. Температурные зависимости интегральной интенсивности НС ($I_{НС}$) комплексов относительно ВС ($I_{ВС}$) комплексов (○) и произведения $I_{НС} \cdot T$ (■). Принято, что $I_{НС} \cdot T = 1$ при 420 К.

ширин линий (рис. 4) и g -факторов (рис. 5) являются полностью обратимыми.

Согласно данным температурных зависимостей интегральных интенсивностей спектров ЭПР НС-комплексов по отношению к ВС-комплексам, а также произведения $I_{НС} \cdot T$, которое характеризует соответствие или отклонение от закона Кюри (рис. 3), в интервале температур 450–260 К количество НС-комплексов остаётся постоянным и составляет 13% от всех регистрируемых комплексов. Однако, изменение ширины линий в этом интервале, обсуждаемом

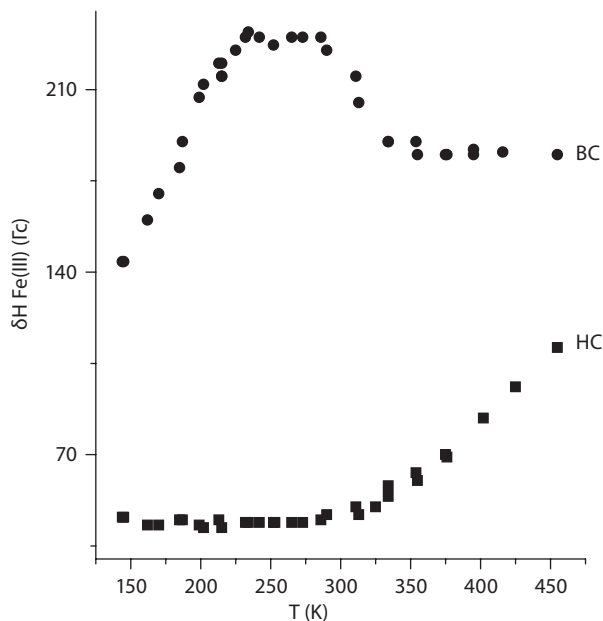


Рис. 4. Температурные зависимости ширины линий сигналов ЭПР ВС- (●) и НС- (■) (перпендикулярная компонента) комплексов.

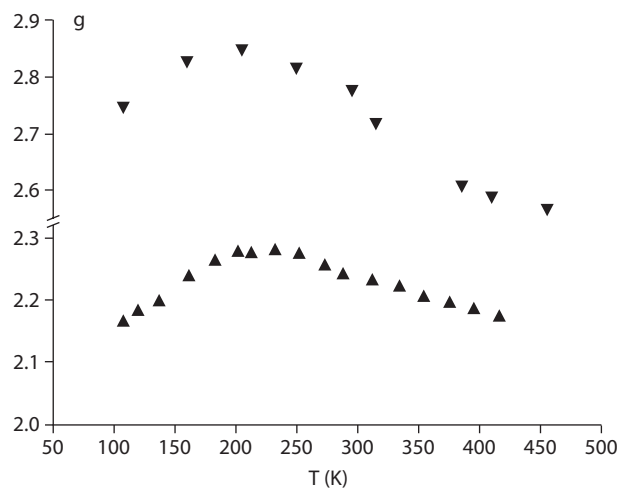


Рис. 5. Температурные зависимости величин g -факторов сигналов ЭПР ВС-комплексов для свежих (▼) и выдержанных (▲) образцов.

ниже, позволяют назвать этот интервал подготовительным к осуществлению спин-переходного процесса.

При температурах ниже 260 ± 10 К растёт произведение $I_{НС} \cdot T$ и интегральная интенсивность НС-комплексов относительно ВС-комплексов, указывая на проявление спин-переходных процессов, протекающих в два этапа. Первый этап 270–180 К более плавный – в нём принимают участие отдельные комплексы. Второй этап 180–100 К более резкий – в нём задействованы практически все комплексы.

Химическая природа и структура макромолекулярной матрицы ионообменного полимера с большими размерами пор, особенно в пористых ионитах, стимулирует образование кластеров с повышенными локальными концентрациями сорбированных ионов [10]. В нашем случае металлокомплексы с объёмными формазановыми лигандами в основном группируются на поверхности пор растёртого полимера, не проникая далеко вглубь зерна, тем более способствуя повышенным локальным концентрациям сорбированного железа, даже если его полная концентрация мала.

Ширина линии ЭПР ВС-комплексов при их сравнительно больших локальных концентрациях обычно обусловлена диполь-дипольными взаимодействиями между парамагнитными центрами со спином $S = 5/2$ [10]. В области температур 450–330 К она остаётся постоянной (рис. 4). По формуле [11, 12]:

$$\delta H_{\text{дд}} = 15.2 \cdot 10^{20} \cdot g \beta C [S(S+1)]^{1/2} \quad (2)$$

мы оценили концентрацию ВС-комплексов в данном температурном интервале. Она составляет $C_{ВС} = 1.98$ М или $n = 1.19 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$. Концентрация НС-комплексов (13% от ВС) $C = 0.26$ М или $n = 0.15 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$.

Ширина линии ЭПР НС-комплексов, общая концентрация которых при высоких температурах невелика

(0.26 М), и они расположены среди ВС-комплексов, в основном должна быть обусловлена диполь-дипольными взаимодействиями между НС- и ВС-комплексами. В таком случае одной из возможных причин сужения линий ЭПР НС-комплексов с понижением температуры в подготовительном периоде (рис. 4) может служить изменение характера диполь-дипольных взаимодействий (НС–ВС при высоких температурах на НС–НС в этом интервале температур за счёт агрегации НС-комплексов). Однако оценки показывают, что учёт только смены дипольных партнёров явно недостаточен. Он обеспечивает менее половины экспериментально наблюдаемого изменения ширины линий ЭПР.

Основной причиной, объясняющей сужение линий ЭПР НС-комплексов в процессе понижения температуры, являются обменные взаимодействия между НС-комплексами, возникающие при их концентрировании. Обменные взаимодействия усредняют диполь-дипольные взаимодействия, и линия сужается. Мы оценили частоту обменного взаимодействия, пользуясь результатами работ [13–15], и, выразив диполь-дипольные взаимодействия через второй момент [16]:

$$\omega_e = \frac{g_{\text{НС}} g_{\text{ВС}}^2 \beta^3 S(S+1)}{1.73 \hbar \delta H_{\text{НС}}} \sqrt{\frac{\pi}{2}} \sum \langle r_{kl} \rangle^{-6} \times [0.6 + \exp(-\omega_0^2/\omega_e^2) + 0.4 \exp(-2\omega_0^2/\omega_e^2)], \quad (3)$$

где δH – ширина линии сигнала ЭПР НС-комплексов в гауссах, $g_{\text{НС}}$ и $g_{\text{ВС}}$ – факторы спектроскопического расщепления НС- и ВС-комплексов Fe(III), соответственно. Учитывая, что

$$\sum \langle r_{kl} \rangle^{-6} = \frac{4\pi N}{3(2a)^3 V} = \frac{\pi C}{6a^3},$$

где C – концентрация НС-комплексов в молях, a – радиус комплекса ($a = 1/2(6 \cdot 10^{20} \text{C})^{1/3}$ и $\omega_0 > \omega_e$, имеем $\omega_e = 1.27 \cdot 10^9$ рад/с при $T = 300$ К, $\omega_e = 1.4 \cdot 10^9$ рад/с при 108 К. Полученные нами величины ω_e хорошо согласуются с величинами ω_e , приведёнными в работе [4] для НС-комплексов в поликристаллах $\text{Na}[\text{Fe}(\text{Th-Sa})_2]$.

Данные по перераспределению и агрегации НС-комплексов в подготовительном периоде позволяют считать, что лишь по достижении критических размеров зародышей (доменов) возможно дальнейшее осуществление спиновых переходов.

Заметим, что ширина линии ЭПР НС-комплексов при $T < 300$ К не зависит от температуры, что свидетельствует о преобладающей роли обменных взаимодействий, усредняющих диполь-дипольные взаимодействия между НС-комплексами после их агрегации.

В концентрированном поликристаллическом образце, из раствора которого осуществлялась сорбция формазановых комплексов Fe(III), наблюдалась изотропная линия ЭПР с $g_0 = (g_{\parallel} + 2g_{\perp})/3 = 2.072 \pm 0.005$, где значения $g_{\parallel}$ и $g_{\perp}$ соответствуют анизотропному спектру НС-комплексов в полимере, т.е. в поликристаллическом образце сильные

обменные взаимодействия усредняют анизотропные величины g -факторов. В этом случае для частоты обменного взаимодействия ω_e должно выполняться условие $\omega_e > (g_{\parallel} - g_{\perp})\beta H/h > 4.46 \cdot 10^9$ рад/с. Для НС-комплексов в полимерной матрице значения ω_e в несколько раз меньше данной величины, поэтому обменные взаимодействия не приводят к усреднению анизотропии g -фактора, но усредняют диполь-дипольные взаимодействия.

Обменные взаимодействия между ВС-комплексами не проявляются вследствие их малости по сравнению с диполь-дипольными взаимодействиями. Обычно усреднение диполь-дипольных взаимодействий обменными взаимодействиями для систем с $S = 5/2$ наблюдается при концентрациях больше 4 М [17].

Небольшое возрастание ширины линии ЭПР ВС-комплексов в подготовительном периоде при понижении температуры от 350 до 270 К можно объяснить конформационной изомерией, свойственной формазановым лигандам [18], и постепенной стабилизацией таутомерно-конформационных искажений, которые усреднялись при более высоких температурах. В этом случае, учитывая асимметричное строение комплексов, таутомерия лигандов должна приводить к некоторому разбросу параметров $\lambda = E/D$ и эффективных g -факторов ВС-комплексов, что проявляется в уширении линий ЭПР (рис. 4) и в сдвиге g -факторов (рис. 5). К уширению линий ЭПР приводит и усиление диполь-дипольных взаимодействий между ВС-комплексами вследствие увеличения их локальных концентраций, вызванного процессом перераспределения НС-комплексов или НС-состояний.

Сужение линий ЭПР ВС-комплексов при $T \leq 230$ К прежде всего связано с ослаблением диполь-дипольных взаимодействий за счёт уменьшения общего количества ВС-комплексов в результате интенсивных спин-переходных процессов. При 100 К концентрации ВС- и НС-комплексов выравниваются до $C = 1.12$ М (выдержанные образцы). С началом спин-переходных процессов может возрастать внутреннее давление [19], которое стабилизирует наиболее энергетически выгодную конформацию ВС-молекул, что приводит к сдвигу эффективного g -фактора к величине, характерной для более симметричных кристаллических полей (рис. 5).

Плато в зависимости ширины линии ВС-комплексов, наблюдаемое в интервале температур 280–240 К, является результатом двух противоположных процессов: стабилизации конформационных искажений и увеличения внутреннего давления.

Спин-переходные свойства комплексов Fe(III) в поликристаллическом состоянии во многом зависят от влияния противоионов, молекул растворителя, а также степени растёртости образцов и их возраста [1, 5, 20]. Мы полагаем, что и в нашем случае процесс старения образцов обязан изменению количества молекул растворителя в окружении Fe(III) ВС-комплексов. В некоторых случаях при повторном приготовлении и для свежих образцов наблюдались спектры аналогичные спектрам выдержанных образцов. Этот эффект мы связываем с

невозможностью абсолютно точно соблюдать одинаковые условия сушки полимеров после иммобилизации на них формазанового комплекса Fe(III) из раствора. Следует отметить, что именно выдержанные образцы являются более стабильными, т.к. даже при их достаточно длительном хранении параметры спектров ЭПР ВС-комплексов не изменяются. В то же время параметры спектров ЭПР НС-комплексов не зависят ни от срока выдержки образцов, ни от повторности их приготовления, что обусловлено большей прочностью связей металл-лиганд и относительно слабой чувствительностью значительных расстояний между крамеровскими дублетами НС-терма к небольшим конформационно-таутомерным искажениям.

Авторы выражают благодарность сотрудникам Уральского государственного лесотехнического университета (г. Екатеринбург) И. Г. Первой и З. Г. Резинских за синтез исследуемых образцов. Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 08-02-01348.

Литература

1. Haddad M., Federer W., Lynch M., Hendrickson D.: *Inorg. Chem.* **20**, 131 (1981)
2. Kahn O., Martinez C.: *Science* **279**, 44–48 (1998)
3. Cantin C., Kliava J., Marbeuf A., Mikailichenko D.: *Eur. Phys. J. B* **12**, 525–540 (1999)
4. Zelentsov V., Yablokov Yu., Augustyniak-Jablokow M., Krupska A., Mrozinski J., Ulanov V.: *Chem. Phys.* **301**, 15–26 (2004)
5. Иванова Т.А., Овчинников И.В., Туранов А.Н.: *ФТТ* **49**, вып. 11, 2033–2038 (2007)
6. Dong T.Y., Ho P.-H., Cheng C.-H., Wang Yu.: *J. Organomet. Chem.* **601**, 253–258 (2000)
7. Sorai H., Seki S.: *J. Chem. Phys. Solids* **35**, 555 (1974)
8. Бузыкин Б.И., Липунова Г.Н., Сысоева Л.П., Русинова Л.И.: *Химия формазанов*. М.: Наука 1992. 376 с.
9. Wickman H., Klein M., Shirley D.: *J. Chem. Phys.* **42**, 2113–2117 (1965)
10. Вишневская Г.П., Молочников Л.С., Сафин Р.Ш.: *ЭПР в ионитах*. М.: Наука 1992. 168 с.
11. Лебедев Я.С., Муромцев В.И.: *ЭПР и релаксация стабилизированных радикалов*. М.: Химия 1972. 255 с.
12. Замаев К.И., Молин Ю.Н., Салихов К.М.: *Спиновый обмен*. Новосибирск: Наука 1977. 318 с.
13. Тимеров Р.Х.: *ДАН СССР* **142**, 870 (1962)
14. Anderson P., Weiss P.: *Rev. Mod. Phys.* **25**, 269–276 (1953)
15. Kubo R., Tomita K.: *J. Phys. Soc. J.* **9**, 888–919 (1954)
16. Al'tshuler S.A., Kozyrev B.M.: *Electron Paramagnetic Resonance in Compounds of Transition Elements*. N.Y.: Wiley 1974. 589 p.
17. Вишневская Г.П.: *Радиоспектроскопия конденсированных сред*, с. 13. М.: Наука 1990.
18. Перова И.Г.: *Иммобилизованные металлокомплексы некоторых d- и f-элементов с гетарилформазанами: синтез, строение и свойства*. Дис. на соиск. учён. степ. докт. хим. наук. Екатеринбург: УГЛУ 2007. 289 с.
19. Ksenofontov V., Gaspar A.B., Gutlich P.: *Top. Curr. Chem.: Spin-Crossover in Transition Metal Compounds III*, p. 23. Berlin: Springer 2004.
20. Nihei M., Shiga T., Maeda Y., Oshio H.: *Coord. Chem. Rev.* **251**, 2606–2621 (2007)

Магнитометры с токовым датчиком магнитного поля: результаты и перспективы

В. А. Гончаров

Лаборатория молекулярной радиоспектроскопии

Кратко рассмотрен предложенный автором принцип построения токовых датчиков магнитного поля – датчиков нового типа, обладающих повышенной чувствительностью по сравнению с известными аналогичными устройствами. Дано описание различных вариантов магнитометров с такими датчиками. Приведены оценки чувствительности магнитометров и варианты их конструктивной реализации. Рассмотрены основные области применения и перспективы совершенствования приборов.

Введение

Цель настоящей работы – конспективно обобщить опыт автора в области измерений слабых магнитных полей с применением токовых датчиков и обозначить перспективы развития этого направления.

Первый магнитометр (измеритель магнитной восприимчивости) с токовым датчиком магнитного поля был создан в лаборатории молекулярной радиоспектроскопии КФТИ в 1996 году [1]. Чувствительность этого прибора по объёмной магнитной восприимчивости составляла 10^{-7} безразмерных единиц СИ, или $10^{-7}/4\pi$ единиц СГСМ. По результатам исследований, проведённых с помощью этого магнитометра (изучались, в основном, магнитные свойства жидкокристаллических комплексов) опубликован ряд статей и защищена кандидатская диссертация. В настоящее время разрешающая способность магнитометров с токовыми датчиками поля, имеющихся в лаборатории, составляет 10^{-10} СГСМ; количество вещества, необходимое для измерений – 1–10 мг.

Главной особенностью токовых датчиков является то, что с их помощью непосредственно измеряют величину тока в короткозамкнутом проводящем контуре. Если такой контур (представляющий собой единичный виток или катушку из n витков изолированного проводника), имеющий индуктивность L и активное сопротивление R , находится во внешнем, зависящем от времени, магнитном поле с соответствующей индукцией $B(t)$ (рис. 1), то электродвижущая сила, наводимая в контуре пронизывающим его суммарным магнитным полем, есть $E(t) = d\Psi(t)/dt$, где $\Psi(t) = \Phi(t) \cdot n - L \cdot I(t)$ – потокосцепление,

$\Phi(t) = B(t) \cdot S$ – поток индукции внешнего поля, S – площадь контура, $I(t)$ – мгновенное значение тока в контуре и $L \cdot I(t)$ – поток, вызванный током $I(t)$.

С другой стороны, $E(t) = I(t) \cdot R$, так что $d[B(t) \cdot S \cdot n - L \cdot I(t)]/dt = I(t) \cdot R$ и

$$B(t) \cdot S \cdot \frac{n}{L} = I(t) + R \cdot \frac{1}{L} \cdot \int_0^t I(t') dt', \quad (1)$$

где t' – переменная интегрирования.

Это соотношение является основным при конструировании интегрирующих и динамических (адиабатических) магнитометров.

Интегрирующий магнитометр

Предположим, что внешнее поле изменяется скачкообразно, т.е. $B(t) = 0$ при $t < 0$ и $B(t) = \text{const} \equiv B$ при $t \geq 0$. Тогда из (1) получаем хорошо известную формулу

$$Q = \int_0^\infty I(t) dt = B \cdot S \cdot \frac{n}{R} = \Phi \frac{n}{R}, \quad (2)$$

где Q – полный заряд, протёкший по контуру; Φ – установившееся значение внешнего потока индукции. В реальном магнитометре интегрирование тока, протекающего в приёмной катушке, обычно осуществляется с помощью операционного усилителя (ОУ), включённого по схеме интегратора (преобразователя “заряд-напряжение”, рис. 2).

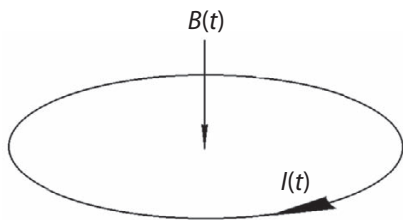


Рис. 1. Замкнутый контур во внешнем магнитном поле.

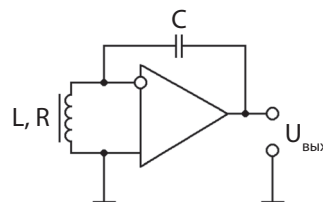


Рис. 2. Интегратор тока на операционном усилителе.

Входное сопротивление такого преобразователя для идеального ОУ равно нулю (реально – сотые доли ома), так что приёмная катушка оказывается замкнутой накоротко через вход преобразователя. При этом

$$U_{\text{вых}} = Q/C = B \cdot S \cdot n/(RC) = \Phi \cdot n/(RC), \quad (3)$$

где C – ёмкость обратной связи. Соотношение (3) позволяет, в частности, оценить чувствительность такой системы для приёмной катушки (контура) “типичных” размеров и простейшей геометрии. В частности, если контур представляет собой круглый виток “провода” (проводника с круглым поперечным сечением), то $R = \rho \cdot 2\pi \cdot a/\pi \cdot b^2 = 2\rho a/b^2 = 2(\rho/b)(a/b)$, где a – средний радиус витка, b – радиус поперечного сечения проводника ($b \ll a$), ρ – его удельное сопротивление. Полагая, например, $a = 10^{-2}$ м, $b = 10^{-3}$ м, $\rho = 0.0175 \cdot 10^{-3}$ Ом·м (медь при комнатной температуре), получаем: $R = 0.35 \cdot 10^{-3}$ Ом. При $C = 10^{-12}$ ф (1 пф) имеем $RC = 0.35 \cdot 10^{-15}$ с и $U_{\text{вых}} = \Phi \cdot 2.857 \cdot 10^{15}$ В. Таким образом, если, например, внешний магнитный поток изменяется на величину $\Phi = \Phi_0 = h/2e = 2.068 \cdot 10^{-15}$ Вб (квант магнитного потока), то изменение выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ составляет 5.91 В. Измеряя $U_{\text{вых}}$ с точностью до 5 мкВ (что далеко не является рекордом при измерении напряжения), можно определить изменение магнитного потока с точностью порядка $10^{-6}\Phi_0$. Площадь контура $S = \pi a^2$ в данном примере составляет $\pi \cdot 10^{-4}$ м², что соответствует чувствительности по магнитной индукции около $3 \cdot 10^{-18}$ тесла. По порядку величины это совпадает с чувствительностью лучших образцов сквид-магнитометров.

Динамический (адиабатический) магнитометр

Рассматривая соотношение (1) при $t \ll L/R$, получаем

$$B(t) \cdot S \cdot n/L = I(t), \quad (4)$$

т.е. при достаточно быстрых изменениях внешнего поля ток в приёмной катушке прямо пропорционален величине этого поля (а не скорости его изменения, в отличие от электродвижущей силы, наводимой полем в катушке).

В качестве иллюстрации перехода от соотношения (1) к его предельному случаю (4), на рис. 3 представлены временные зависимости тока в катушке, имеющей различные по величине показатели L/R , после скачкообразного изменения внешнего магнитного поля. Важно отметить, что в выбранном (в качестве примера) временном масштабе ток в катушке при $L/R \gg t_{\text{max}} = 10$ с ведёт себя так, как если бы катушка была сверхпроводящей, т.е. “отрабатывает” внешнее поле.

На практике в динамических магнитометрах используют преобразователи “ток-напряжение”, где элементом обратной связи операционного усилителя служит резистор (а не конденсатор, как в интегрирующем преобразователе),

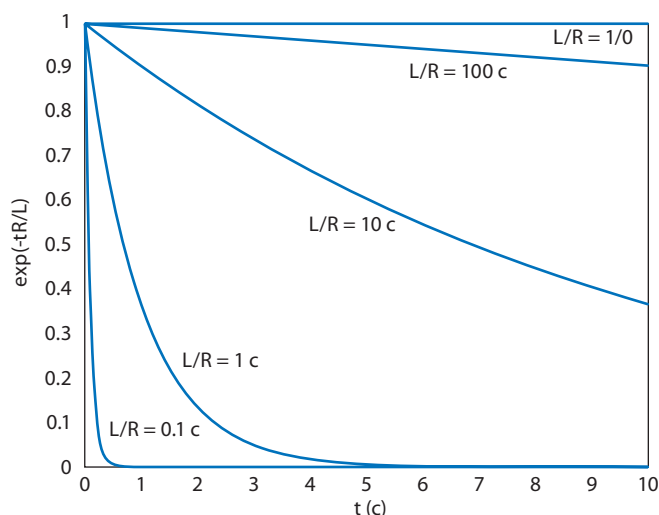


Рис. 3. Зависимость тока в замкнутом проводящем контуре с индуктивностью L и активным сопротивлением R от времени. Предельный случай $L/R = 1/0$, т.е. $R = 0$, соответствует сверхпроводящему контуру.

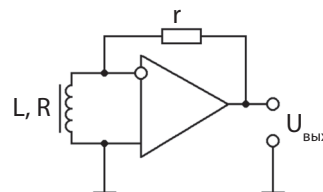


Рис. 4. Преобразователь “ток-напряжение” на операционном усилителе.

см. рис. 4. Коэффициент преобразования в этом случае численно равен r .

Не приводя здесь соответствующих выкладок, отметим, что чувствительность интегрирующего и динамического магнитометров по порядку величины (10^{-18} Тл) одна и та же, но во втором случае выходной сигнал преобразователя не зависит от омического сопротивления катушки, что важно, например, при исследовании температурной зависимости магнитной восприимчивости, а система в целом является более помехоустойчивой и быстродействующей.

Конструкция и применение

Разработанные автором токовые датчики “открытого” типа, в которых приёмная катушка выполнена, как правило, в виде соленоида с ферромагнитным сердечником, находят применение в магнитной геологоразведке (метод “становления магнитного поля” и магнитотеллурические методы) и уже более десяти лет используются, например, в объединении “Казаньгеофизика”. Аналогичные датчики могут применяться также и при исследовании биогенных магнитных полей.

Отдельной, и весьма важной, областью применения токовых датчиков является измерение магнитной вос-

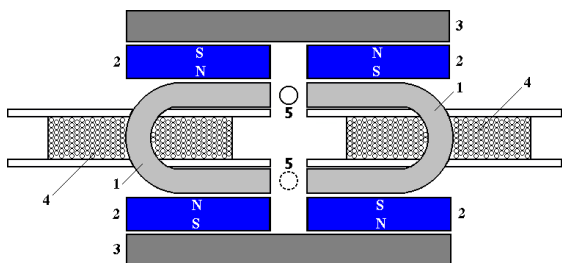


Рис. 5. Схема измерительного блока магнитометра: 1 – магнитопровод; 2 – постоянные магниты; 3 – ядро; 4 – приёмные катушки; 5 – ампула с образцом.

приимчивости вещества. Сердечник приёмной катушки (катушек) измерителя восприимчивости обычно представляет собой кольцевой магнитопровод (из ферромагнитного материала с высокой магнитной проницаемостью), имеющий зазоры для помещения образца исследуемого или “эталонного” вещества. С помощью электромагнита или системы постоянных магнитов в зазорах создаётся “подмагничивающее” поле. Изменение магнитного потока через приёмные катушки достигается перемещением образца (в рабочем зазоре и за его пределами). Движение образца может быть, например, “маятникообразным” или продольным возвратно-поступательным – в этих случаях вещество помещают в удлинённую тонкостенную ампулу – либо вращательным (образец – “таблетка” на периферии вращающегося диска).

Один из вариантов магнитной системы (измерительного блока) магнитометра с токовым датчиком представлен на рис. 5 и 6. Этот вариант предназначен, главным образом, для работы в составе интегрирующего магнитометра. Движение образца – тангенциальное или продольное, с частотой ~ 1 Гц и амплитудой ~ 1 см.

В адабатическом магнитометре, как уже отмечалось, образец приводится в движение с помощью вращающегося диска диаметром около 2 см (на фотографии он не показан). Частота вращения диска – до 1 кГц. Эта система может быть использована также и в качестве измерительного блока интегрирующего магнитометра.

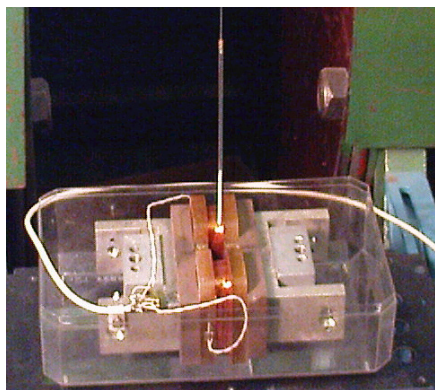


Рис. 6. Общий вид измерительного блока магнитометра.

В лаборатории магнитной радиоспектроскопии КФТИ КазНЦ РАН в 2009 году: разработана и изготовлена система сбора данных с токовых магнитометрических датчиков; создано программное обеспечение для обработки выходного сигнала интегрирующего магнитометра, позволяющее определять абсолютные значения магнитной восприимчивости исследуемого вещества по данным измерений и эффективно подавлять случайные и периодические помехи; разработан и изготовлен токовый магнитометрический датчик для адиабатического магнитометра, пригодный также и для работы в составе интегрирующего магнитометра.

Перспективы развития и применения

Известные установки для измерения слабых магнитных полей и статической магнитной восприимчивости парамагнитных и диамагнитных веществ весьма сложны и громоздки, их стоимость исчисляется сотнями тысяч долларов (например, SQUID-магнитометры фирм Tristan Technologies Inc. [2], F.I.T.Messtechnik GmbH [3] или магнитометры с вибрирующим образцом фирм Lake Shore Cryotronics Inc., серия 7400 [4] и Oxford Instruments plc, серия MagLab [5]). Такими установками располагают лишь самые крупные исследовательские учреждения.

Магнитометры с токовыми датчиками, не уступая SQUID-магнитометрам по своим метрологическим параметрам, более компактны и технологичны (в частности, возможно создание малогабаритных приборов для работы в условиях заводских и клинических лабораторий и в полевых условиях). Стоимость их на два порядка ниже, они не требуют применения криогенной техники. Приборы такого типа должны найти широкое применение как в фундаментальных исследованиях (коллоидная химия, биохимия, физика тонких плёнок и магнитных жидкостей), так и в медицинской диагностике [6] (гематология, магнитная кардиография и энцефалография) и в электромагнитной геологоразведке.

Основным направлением в совершенствовании токовых датчиков магнитного поля является оптимизация их геометрических и электрофизических характеристик – выбор оптимальных размеров и конфигурации датчиков, материала сердечников приёмных катушек, улучшение схемотехники.

Литература

1. Гончаров В.А., Туранов А.Н.: Приборы и техника эксперимента № 4, 145–147 (1998)
2. <http://www.tristantech.com>
3. <http://www.finoag.com>
4. <http://www.lakeshore.com>
5. <http://www.oxinst.com>
6. Andra W., Nowak H. (eds.): Magnetism in medicine: a handbook. Berlin, Weinheim, New York, Chichester, Brisbane, Singapore, Toronto: Wiley-VCH 1998. 512 p.

Эффекты магнитных поляронов в поведении индуцированной намагниченности EuB_6 по данным магнитного резонанса

Т. С. Альтшулер, Ю. В. Горюнов

Лаборатория физики перспективных материалов

Были проведены измерения электронного спинового резонанса (ЭСР) монокристаллов EuB_6 на частоте 9.25 ГГц в диапазоне температур от 10 до 300 К. В интервале температур 40–300 К наблюдалась одиночная линия от ионов Eu^{2+} . При дальнейшем понижении температуры происходило расщепление этой одиночной линии на две линии ЭСР той же формы. Анализ спектров ЭСР свидетельствуют о том, что в монокристаллах EuB_6 нами наблюдается магнитное фазовое расслоение, которое вызвано образованием связанных состояний локализованных магнитных моментов ионов Eu^{2+} с электронами проводимости и валентными электронами (дырками). За эти связанные состояния ответственны два различных типа связи между локализованными спинами европия и носителями заряда: кондо-связь с дырками и антикондо-связь с электронами проводимости с образованием магнитных поляронов (ферронов), соответственно, двух типов (зарядовое расслоение). Обнаружена анизотропия величины намагниченности более интенсивной магнитной фазы. Сделана оценка углового распределения магнитного момента полярона.

Введение

Гексаборид европия оказался уникальным соединением, в котором проявились самые разнообразные свойства, интенсивно исследуемые в последние годы в других системах: магнитное фазовое расслоение и колоссальное магнетосопротивление (КМР); кондо-взаимодействия высокоспиновых состояний, автолокализации электронов проводимости. Вызвано это как уже существующим интересом практического применения эффекта КМР, так и потребностями развития спинтроники.

Европий, как и соседние с ним лантан и гадолиний, образует гексаборид с простой кубической кристаллической структурой (группа симметрии $Pm\bar{3}m$) с ионом Eu^{2+} в состоянии $^8S_{7/2}$ в центре элементарной ячейки и восьмью B_6 -октаэдрами Eu^{2+} по её углам. Чистый EuB_6 является полуметаллом, обладающим сложной зонной структурой [1–3]. Вследствие этого физические свойства EuB_6 оказываются также не простыми и обнаруживают определённые мотивы сходства с родственными соединениями. Например, SmB_6 – известное соединение с переменной валентностью, с выраженным эффектом Кондо и сильным парамагнетизмом Ван-Флека [4]. [2] сообщает о результатах расчётов кондо-эффекта в валентной зоне и в зоне проводимости чистого EuB_6 . Элементарный Eu под давлением переходит в немагнитную электронную конфигурацию и становится сверхпроводником [5]. При низких температурах чистый EuB_6 , в отличие от других редкоземельных боридов, ферромагнитен. Это состояние достигается посредством двух последовательных переходов при $T = 15.5$ К и $T = 12.6$ К [6]. В этой же области температур наблюдается переход металл-полуметалл и КМР [7].

В последние годы появились работы [8–13], указывающие на образование в EuB_6 магнитных поляронов

(ферронов) при температурах выше T_m , что, по сути, является мелкомасштабным магнитным фазовым расслоением. Последнее называется в качестве причины возникновения КМР для многих соединений [14, 15]. Поэтому несомненный интерес представляет изучение особенностей этого расслоения и выяснение его более глубоких причин, таких как взаимодействие локализованных f-состояний европия с нелокализованными d- и p-состояниями зоны проводимости и валентной зоны, которое за счёт их гибридизации может приводить к образованию связанных кондо- или ферронных состояний. Вклад в образование ферронных состояний может вносить и магнитное взаимодействие нелокализованных электронов с ван-флековской поляризацией ионных остовов аналогично тому, как это происходит в SmB_6 [4].

Данное исследование является продолжением работы [16] и имеет целью выяснение особенностей фазового расслоения в EuB_6 , связанных с образованием магнитных поляронов. Здесь представлены результаты экспериментов по измерению электронного спинового резонанса (ЭСР) на тонких монокристаллических пластинах различной кристаллической ориентации.

Эксперимент

Образцы и измерения ЭСР

Монокристаллы EuB_6 были синтезированы боротермическим методом из Eu_2O_3 . Чистота Eu_2O_3 была 4N, чистота бора с естественным содержанием изотопов 3N. Вследствие зонной очистки (зонная плавка – ЗП) содержание примесей уменьшалось. Оптический спектральный анализ показал, что общее содержание посторонних примесей в монокристалле не превышает

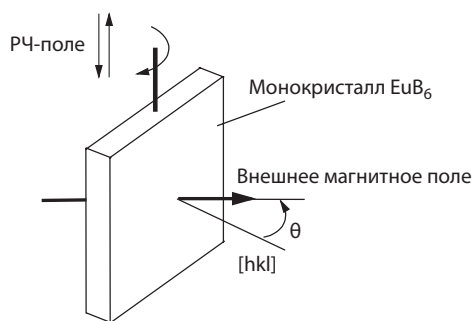


Рис. 1. Схема эксперимента по измерению ЭСР на монокристаллах EuB_6 . $[hkl]$ – кристаллографические направления, перечисленные в тексте.

10^{-3} вес.%. Постоянная решетки, являющейся для данного соединения чувствительной к содержанию примесей величиной, составляет $4.184679 \pm 0.000015 \text{ \AA}$ и находится в полном согласии с данными [17]. Для исследований ЭСР использовались полированные монокристаллические пластины толщиной 0.5 мм и размером 3×3 мм, вырезанные в ориентации $[100]$ из центральной части монокристаллического слитка.

Мы также использовали для исследования ЭСР монокристаллический образец, выращенный методом “раствор в расплаве” (РР) как в [18]. Постоянная решетки этого образца составляла $4.18260 \pm 0.00004 \text{ \AA}$. Образец имел размеры $1 \times 2 \text{ мм}^2$, толщину 0.2 мм и ось $[100]$, перпендикулярную к плоскости образца. Монокристаллические образцы EuB_6 для исследований анизотропии величины намагниченности были идентичных размеров и формы и имели нормали к плоскости образца, направленные вдоль кристаллографических направлений $[100]$, $[110]$, $[111]$ и 16° от направления $[100]$.

Измерения ЭСР были выполнены на частоте 9.25 ГГц в прямоугольном резонаторе TE_{102} в проточном гелиевом криостате, позволяющем регулировать температуру от 7 до 300 К. Измерения температурных зависимостей ЭСР-спектров тонких монокристаллических пластин были выполнены для перпендикулярной ($\theta = 90^\circ$) и параллельной ($\theta = 0^\circ$) ориентаций плоскости образца относительно внешнего магнитного поля (см. рис. 1).

Результаты эксперимента по ЭСР в EuB_6 и их обсуждение

В нашем эксперименте при комнатной температуре для всех образцов, независимо от их ориентации, наблюдалась одиночная линия ЭСР от ионов Eu^{2+} с $g = 1.96$ и шириной $\delta H \sim 800 \text{ Э}$. (В литературе имеется некоторый разброс полученных значений g -факторов. Так в работе [19] наблюдался $g = 1.99$, в [20, 21] $g = 2.00$ и 2.03 в [3]). Линия имела лоренцеву форму с примесью дисперсии, вызванной проводимостью образца [22, 23].

Ион Eu^{2+} имеет электронный спин $S = 7/2$, ядерный спин $5/2$. Это в общем случае предполагает наблюдение 84 резонансных линий. Отсутствие тонкой и сверхтонкой

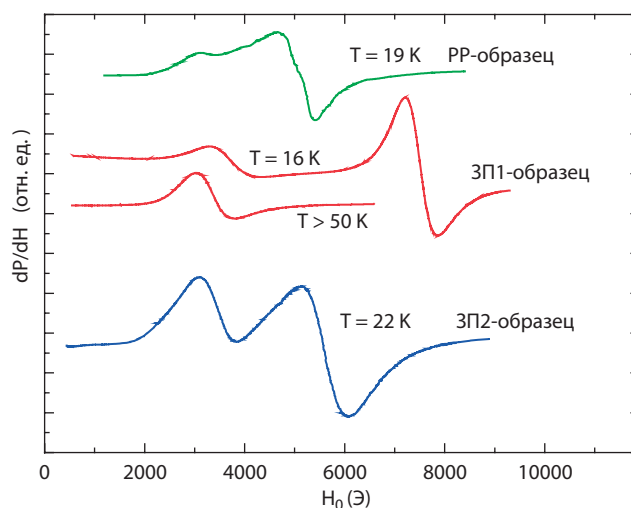


Рис. 2. Спектры ЭСР ионов Eu^{2+} в монокристаллах EuB_6 , выращенных методами РР и ЗП, при $\theta = 90^\circ$. Линия, маркированная как $T > 50 \text{ К}$ соответствует спектру ЭСР при высоких температурах 50–300 К. Другие линии – спектры при температурах, при которых имеет место магнитное фазовое расслоение.

структур указывает на усреднение этих линий сильными обменными взаимодействиями. На это же указывает лоренцева форма линии. Вплоть до 50 К положение и форма линии ЭСР не зависят от ориентации плоскости образца относительно магнитного поля. При $T = 50 \text{ К}$ линия ЭСР расщепляется на две линии с g -факторами 1.95 и 2.06. (см. рис. 2 и 3). Ниже 50 К вид спектра ЭСР зависит от ориентации плоскости образца относительно статического магнитного поля.

Поведение угловых и температурных зависимостей спектров ЭСР (H_r – резонансное поле) для образцов, полученных разными методами, качественно одинаково (см. рис. 2–4), т.е. для $\theta = 90^\circ$ при понижении температуры

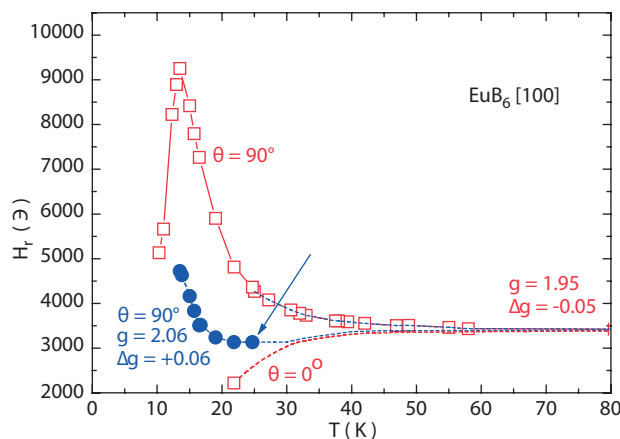


Рис. 3. Температурные зависимости положения линий магнитного резонанса H_r локализованных моментов Eu^{2+} в EuB_6 , связанных обменным взаимодействием с электронами проводимости ($\square$) или с дырками ($\bullet$) при $\theta = 90^\circ$ и $T < 50 \text{ К}$. Положение H_r при $\theta = 0^\circ$ также показано для $T = 22 \text{ К}$.

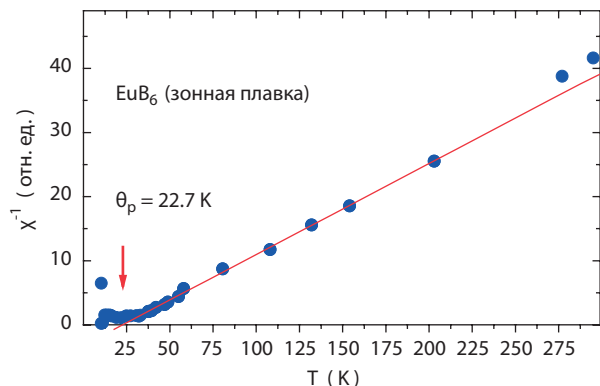


Рис. 4. Температурная зависимость обратной интенсивности спектра ЭСР ($\theta = 90^\circ$) для образца EuB_6 , выращенного методом зонной плавки (ЗП).

в высокие поля уходит сначала одна линия, затем, при дальнейшем понижении температуры, в высокие поля сдвигается вторая линия. Интенсивность и температурное поведение этих линий ЭСР различаются. Различается и соотношение их интенсивностей. Это различие, очевидно, связано с количеством примесей в кристалле, на которое косвенно указывает различие постоянных решётки этих образцов.

Когда плоскость образца перпендикулярна статическому магнитному полю ($\theta = 90^\circ$), при понижении температуры более интенсивная линия сдвигается в сторону высоких полей и при 13.5 К достигает ~ 10 кЭ. Затем эта линия резко сдвигается в сторону низких полей. Вторая линия остаётся в исходном положении до 20 К (кружки на рис. 3) и смещается также в сторону высоких полей при $T < 20$ К, так что при $T < 13.5$ К резонансные сигналы движутся навстречу друг другу (рис. 2, 3). При этом форма линии становится не лоренцевой.

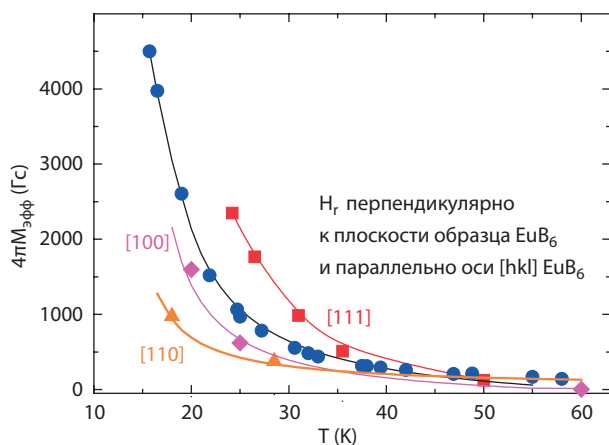


Рис. 5. Температурная зависимость эффективной намагниченности, рассчитанной для перпендикулярной ориентации статического магнитного поля к плоскости образца с различными ориентациями кристаллографических осей. Символы соответствуют следующим ориентациям: $\blacksquare$ – [111], $\blacklozenge$ – [100], $\blacktriangle$ – [110], $\bullet$ – промежуточная ориентация. Ось [100] отклонена на 16° от нормали.

В случае ориентации плоскости образца вдоль статического магнитного поля ($\theta = 0^\circ$) и первая, и вторая линии ЭСР стремятся в низкие поля (см. точку при $T = 22$ К на рис. 3). Измерения температурной зависимости положения сигнала ЭСР было выполнено на монокристаллах, вырезанных из одного слитка так, чтобы нормаль к плоскости образца располагалась вдоль различных осей кристалла [100], [110], [111], а также в промежуточном направлении. Обнаружено, что положение сигнала ЭСР зависит от направления кристаллических осей относительно плоскости образца (см. рис. 3 и 5).

Резонансное поле для сильного магнетика определяется многими факторами, такими как кристаллическая магнитная анизотропия, анизотропия Нееля, размагничивающие и внутренние обменные поля [24–26]. Путём анализа возможных причин изменения резонансного поля установлено, что главным фактором, определяющим изменение резонансного поля в условиях нашего эксперимента, является размагничивающее поле. В нашем простейшем случае, когда внешнее магнитное поле параллельно или перпендикулярно плоскости образца, положение резонансной линии рассчитывается по хорошо известным формулам [26]. Положение магнитного резонанса в параллельной геометрии при $\theta = 0$ даётся выражением:

$$H_r(T) = \sqrt{H_{r0}^2 + 4\pi^2 M_{\text{эфф}}^2(T)} - 2\pi M_{\text{эфф}}(T), \quad (1)$$

где H_{r0} – резонансное поле при высоких температурах (парамагнитное состояние), $M_{\text{эфф}}(T)$ – эффективная намагниченность. Для тонкой пластины в перпендикулярном ей магнитном поле ($\theta = 90^\circ$)

$$H_r(T) = H_{r0} + 4\pi M_{\text{эфф}}(T). \quad (2)$$

Хотя эти формулы не совсем строгие для упорядоченного ферромагнетика вблизи точки Кюри, мы используем их для приблизительного описания положения резонансных линий. Из формул (1) и (2) и измеренных величин резонансных полей для перпендикулярной и параллельной ориентаций плоскости образца относительно статического магнитного поля, эффективная намагниченность $4\pi M_{\text{эфф}}$ при 20 К определена как 2020 и 2380 Гс, соответственно. Так как различие составляет около 15%, можно заключить, что сдвиг резонансной линии определяется главным образом размагничивающими полями. Ферромагнетизм исследуемых образцов также подтверждается классическим температурным поведением обратной интенсивности спектра, пример которого приведён на рис. 4. Парамагнитная температура Кюри, оценённая из этих данных для образцов, полученных различными методами, составляет 23 К. Вся совокупность спектров для одного и того же образца прекрасно (полное совпадение с экспериментом) симулируется двумя линиями с постоянным соотношением их интенсивностей.

В ряде работ (см., например, [6–11]) прямо указывается, что магнитные и транспортные свойства EuB_6

можно объяснить существованием магнитных поляронов (ферронов), которые являются связанными состояниями электронов проводимости и локализованных моментов. По данным магнитной фазовой диаграммы, полученной в работе [8], EuB_6 , область поляронного состояния начинается при температуре 40–30 К. Их появление сопровождается автолокализацией носителей заряда. Автолокализация является причиной увеличения удельного сопротивления гексаборида европия, которое наблюдается при 15–40 К. Согласно многочисленным исследованиям, никаких других особенностей (например, структурные изменения и т.д.) не наблюдается в EuB_6 в этом интервале температур. Таким образом, расщепление линии ЭСР на две линии обусловлено только образованием поляронов. Поскольку температурные зависимости этих двух линий не коррелируют друг с другом, мы можем заключить, что существуют две различных области поляронных состояний. Как уже упоминалось выше, наблюдаемые линии ЭСР имеют g -факторы 1.95 и 2.06. То есть относительно $g = 2.00$, более и менее интенсивные линии имеют отрицательный и положительный сдвиги g -фактора, $\Delta g = -0.05$ и $+0.06$, соответственно. Очевидно, что знак и значение сдвига g -фактора относительно его значения $g = 2.0$ для свободного электрона определяются наличием и типом

носителей заряда, взаимодействующих с локализованными моментами.

Мы обнаружили, что характер расщепления зависит от направления осей кристалла относительно статического магнитного поля. Это является дополнительным аргументом в пользу основной причины расщепления линии ЭСР-формирования в образце магнитной фазовой неомогенности, а также новым интересным результатом, касающимся свойств поляронного состояния.

Рисунок 5 показывает эффективную намагниченность, рассчитанную с использованием величины резонансных полей основной резонансной линии EuB_6 , с различными кристаллическими осями при $\theta = 90^\circ$. По величине максимума эффективной намагниченности была оценена средняя величина магнитного момента, приходящегося на один ион Eu^{2+} . Эти величины составили, соответственно, для первой и второй фазы, 5.2 и 5.6 μ_B , что вполне соответствует величине, полученной из нейтронных экспериментов – 6.9 μ_B [27].

Далее, мы можем сконструировать диаграмму зависимости величины индуцированной внешним магнитным полем намагниченности от кристаллографического направления. Сечение этой диаграммы в плоскости (110) показано на рис. 6. Здесь же на вставке для наглядности показана кристаллическая ячейка EuB_6 . Следует отметить, что диаграмма свидетельствует об анизотропии величины индуцированного внешним магнитным полем намагниченности при температурах существенно выше температуры перехода в ферромагнитное состояние в то время как даже для классических ферромагнетиков при наличии сильной магнитной анизотропии величина спонтанной намагниченности изотропна. Мы можем связать данное явление только с анизотропией поляризуемости магнитного полярона (феррона) в гексабориде европия.

Заключение

Анализ спектров ЭСР и оценки магнитных моментов европия, полученные из температурных зависимостей намагниченности для обеих линий, показывают, что в EuB_6 наблюдается магнитное фазовое расслоение. Это вызвано с образованием связанных состояний магнитных моментов Eu^{2+} ионов с электронами проводимости и валентных электронов (дырок). Мы предполагаем, что наблюдали проявление двух различных типов связи между локализованными спинами европия и носителями заряда: кондо-связь с дырками и антикондо-связь с электронами проводимости. Взаимодействие носителей заряда с локализованными магнитными моментами в EuB_6 может сопровождаться автолокализацией свободных носителей заряда и образованием магнитных поляронов (ферронов) двух типов (собственно, это есть мелкомасштабное зарядовое расслоение [13, 29]). Данные выводы дополнительно подтверждаются наблюдением в парамагнитном состоянии анизотропии величины индуцированной намагниченности, которая, очевидно, связана с различием

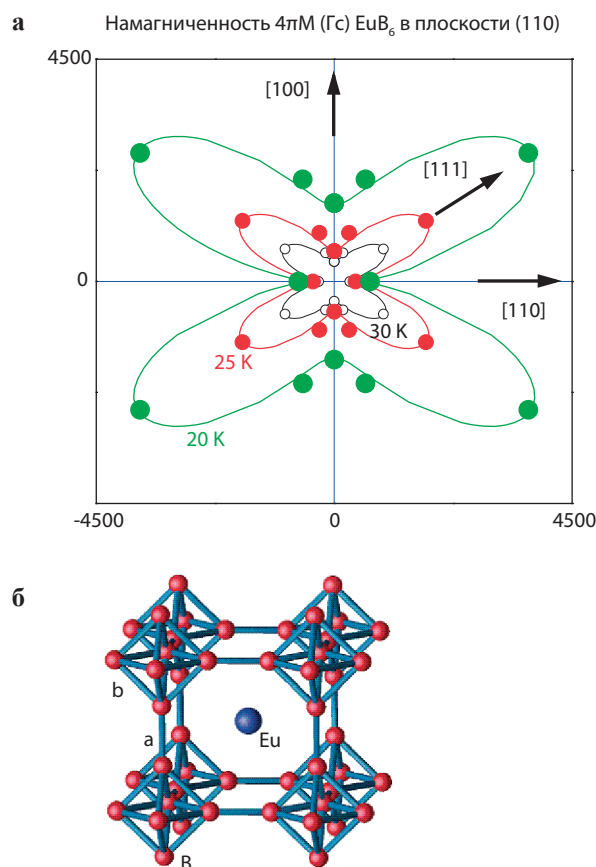


Рис. 6. а Диаграмма “эффективная намагниченность – кристаллографическое направление в плоскости (110)” для различных температур. **б** Кристаллическая ячейка EuB_6 .

поляризуемости магнитного полярона (феррона) вдоль различных направлений в кристалле EuV_6 , определяемой особенностями движения носителей заряда вблизи локализованных моментов Eu.

Авторы благодарны Н. Ю. Шицеваловой и А. В. Духненко за предоставление образцов.

Литература

1. Wigger G.A., Monnier R., Ott H.R.: Phys. Rev. B **69**, 125118(1-13) (2004)
2. Kunes J., Pickett W.E.: Phys. Rev. B **69**, 165111(1-9) (2004)
3. Urbano R.R., Pagliuso P.G., Rettori C., Schlottmann P., Sarrao J.L., Bianchi A., Nakatsuji S., Fisk Z., Velazquez E., Oseroff S.B.: Phys. Rev. B **71**, 184422(1-9) (2005)
4. Altshuler T.S., Bresler M.S., Goryunov Yu.V.: JETP Lett. **81**, 475–478 (2005)
5. Debessai M., Matsuoka T., Hamlin J.J., Schilling J.S., Shimizu K.: Phys. Rev. Lett. **102**, 197002(1-4) (2009)
6. Fisk Z., Johnston D.C., Cornut B., von Molnar S., Oseroff S., Calvo R.: J. Appl. Phys. **50**, 1911–1913 (1979)
7. Sullow S., Prasad I., Aronson M.C., Bogdanovich S., Sarrao J.: J. Appl. Phys. **87**, 5591–5593 (2000)
8. Matthias B.T.: Phys. Lett. A **27**, 511 (1968)
9. Nyhus P., Yoon Y., Kauffman M., Cooper S.L., Fisk Z., Sarrao J.: Phys. Rev. B **56**, 2717–2721 (1997)
10. Snow C.S., Cooper S.L., Young D.P., Fisk Z., Comment A., Ansermet J.-Ph.: Phys. Rev. B **64**, 174412(1-12) (2001)
11. Rhyee J.-S., Cho B.K., Ri H.-C.: Phys. Rev. B **67**, 125102(1-8) (2003)
12. Chatterjee Ja., Yu U., Min B.I.: Phys. Rev. B **69**, 134423(1-5) (2004)
13. Calderon M.J., Wegener L.G.L., Littlewood P.B.: Phys. Rev. B **70**, 092408(1-4) (2004)
14. Kim K.H., Uehara M., Kiryukhin V., Cheong S.-W.: arXiv:cond-mat/0212113 v1 5 Dec 2002
15. Kagan M.Yu., Klaptsov A.V., Brodskii I.V., Kugel' K.I., Sboichakov A.O., Rakhmanov A.L.: Phys. Uspekhi **46**, 851–854 (2003)
16. Altshuler T.S., Goryunov Yu.V.: JETP Lett. **88**, 779–780 (2008); Альтшулер Т.С., Горюнов Ю.В.: Казанский физико-технический институт имени Е. К. Завойского 2007. Ежегодник, с. 97–100. Казань: ФизтехПресс 2008.
17. Kasaya M., Tarascon J.M., Etourneau J., Hagenmuller P.: Mat. Res. Bull. **13**, 751–756 (1978)
18. Futamoto M., Aita T., Kawabe V.: Jap. J. Appl. Phys. **14**, 1263–1266 (1975)
19. Tarascon J.M., Etourneau J., Dance J.M., Hagenmuller P.: J. Less-Comm. Met. **22**, 277–283 (1981)
20. Glaunsinger W.S.: Phys. Stat. Sol. (b) **70**, K151-K155 (1975)
21. Glaunsinger W.S.: J. Magn. Reson. **18**, 265–275 (1975)
22. Dyson F.J.: Phys. Rev. **98**, 349–359 (1955)
23. Peter M., Shaltiel D., Wernick J.H., Williams H.J., Mock J.B., Sherwood R.C.: Phys. Rev. **126**, 1395–1402 (1962)
24. Sulow S., Prasad I., Aronson M.C., Sarrao J.L., Fisk Z., Hristova D., Lacerda A.H., Hundley V.F., Vigliante A., Gibbs D.: Phys. Rev. B **57**, 5860–5869 (1998)
25. Sulow S., Prasad I., Aronson M.C., Bogdanovich S., Sarrao J.L., Fisk Z.: Phys. Rev. B **62**, 11626(1-6) (2000)
26. Goryunov Yu.V., Garif'yanov N.N., Khaliullin G.G., Garifullin I.A., Tagirov L., Schreiber R.F., Muhge Th., Zabel H.: Phys. Rev. B **52**, 13450–13458 (1995)
27. Henggeler W., Ott H.R., Young D.P., Fisk Z.: Solid State Commun. **108**, 929–932 (1998)
28. Molnar von S., Tarascon J.M., Etourneau J.: J. Appl. Phys. **52**, 2158–2162 (1981)
29. Kagan M.Yu., Kugel K.I.: Phys. Uspekhi **44**, 553–570 (2001)

Эффекты пиннинга в керамических образцах $\text{SmO}_{1-x}\text{F}_x\text{FeAs}$ по данным микроволнового поглощения

Н. Ю. Панарина, Ю. И. Таланов, Т. С. Шапошникова, Н. Р. Бейсенгулов, Е. Л. Вавилова, В. Е. Катаев

Лаборатория физики перспективных материалов

Измерения модулированного микроволнового поглощения (ММВП) выявили сильный пиннинг вихрей в керамических образцах высокотемпературного сверхпроводящего (ВТСП) соединения $\text{SmO}_{1-x}\text{F}_x\text{FeAs}$ с содержанием фтора $x = 0.06, 0.08$ и 0.1 . Анализ формы петли гистерезиса ММВП позволил разделить вклады межзёрненного и внутризёрненного пиннинга. Линии необратимости пниктидов характеризуются резким наклоном, сравнимым по крутизне с линией необратимости в керамике $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$, которая, как известно, обладает наибольшей силой пиннинга среди купратных ВТСП. Слабая зависимость плотности критического тока от магнитного поля указывает на наличие дополнительных центров пиннинга в образцах с низким содержанием фтора ($x = 0.06, 0.08$). Сравнительный анализ экспериментальных данных и результатов теоретического моделирования даёт основания полагать, что сильный пиннинг в пниктиде $\text{SmO}_{1-x}\text{F}_x\text{FeAs}$ обусловлен наноразмерными включениями несверхпроводящей фазы, сосуществующей со сверхпроводящей фазой при определённом уровне допирования фтором.

Введение

Недавнее открытие нового класса высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) на основе пниктида железа ReFeAsO ($\text{Re} = \text{Sm}, \text{Nd}, \text{Pr}, \text{Ce}, \text{La}$) [1] получило резонанс в научном сообществе. В отличие от купратных ВТСП, в оксипниктидах сверхпроводимость возникает в плоскостях, содержащих ионы железа. Отличается и исходное состояние недопированных материалов: антиферромагнитный металл в случае пниктидов и моттовский изолятор в случае купратов. Помимо теоретического интереса к пниктидам, остаётся открытым вопрос о том, каковы перспективы практического применения этих материалов.

Среди известных на сегодняшний день пниктидов, соединение $\text{SmO}_{1-x}\text{F}_x\text{FeAs}$ обладает одной из наибольших критических температур ($T_c \sim 55$ К) при высоком уровне допирования фтором [2, 3]. Сверхпроводящие характеристики данного “рекордного” материала, такие как плотность критического тока j_c и линия необратимости $H_{irr}(T)$, которая представляет собой границу между состояниями с нулевой и ненулевой плотностью критического тока, приобретают особое значение. В соединении $\text{SmO}_{1-x}\text{F}_x\text{FeAs}$ магнитный порядок типа антиферромагнитной волны спиновой плотности и сверхпроводимость могут сосуществовать в определённом диапазоне концентраций примеси фтора (см., например, [4]). Сосуществование двух фаз может оказать непосредственное влияние на пиннинг, поскольку включения несверхпроводящей фазы могут служить центрами пиннинга вихрей.

В настоящей работе эффекты пиннинга в керамических образцах $\text{SmO}_{1-x}\text{F}_x\text{FeAs}$ изучаются методом модулированного микроволнового поглощения (ММВП). Метод основан на измерении микроволновой мощности,

рассеиваемой вихревыми нитями, которые возникают при переходе образца в сверхпроводящее состояние. Такие измерения дают информацию о силе пиннинга вихрей (см., например, работу [5] и ссылки в ней). Следует отметить, что данный метод ранее успешно применялся для исследования купратных ВТСП-материалов и позволил оценить сверхпроводящие параметры, которые определяются свойствами вихревой системы [6, 7].

Материалы и методы

Образцы $\text{SmO}_{1-x}\text{F}_x\text{FeAs}$ были приготовлены в Институте материаловедения и твёрдого тела им. Лейбница (Дрезден, Германия) и представляли собой спечённую керамику. Элементный состав синтезированных образцов определялся с помощью волнодисперсионного рентгено-спектрального микроанализа (WDX), в соответствии с которым отношение действительного содержания фтора к закладываемому в шихту составляет примерно 1:2.5. По данным WDX концентрация фтора x в трёх исследованных нами образцах $\text{SmO}_{1-x}\text{F}_x\text{FeAs}$ составляет 0.06, 0.08 и 0.1.

С помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) исследовалась микроструктура образцов. Для примера на рис. 1а и б приведены изображение поверхности и распределение поперечных размеров зёрен для образца $\text{SmO}_{0.9}\text{F}_{0.1}\text{FeAs}$. Как видно из рис. 1а, образцы состоят из спечённых сверхпроводящих зёрен, имеющих форму параллелепипедов со средними размерами $1 \times 2.5 \times 10$ мкм³. Следует отметить, что морфология поверхности одинакова для всех исследуемых образцов.

Температура перехода в сверхпроводящее состояние T_c определялась по измерениям температурной

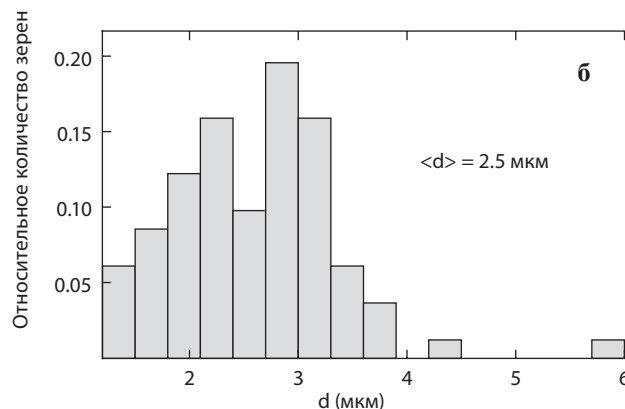
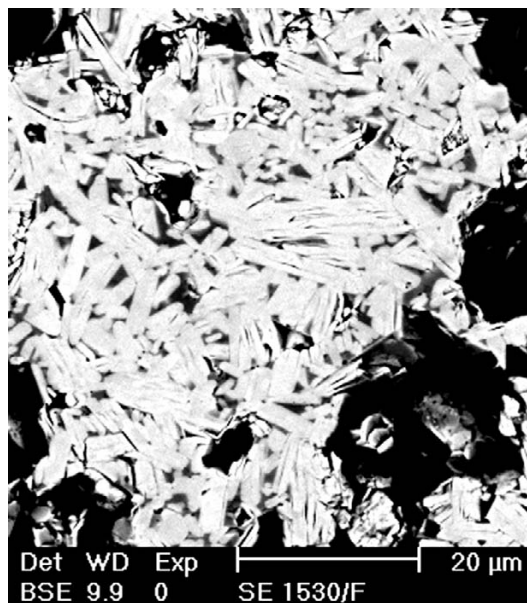


Рис. 1. **а** Изображение СЭМ поверхности керамического образца $\text{SmO}_{0.9}\text{F}_{0.1}\text{FeAs}$. Белые параллелипеды, сверхпроводящие зёрна; чёрные области, пустоты. **б** Гистограмма распределения поперечных размеров зёрен образца $\text{SmO}_{0.9}\text{F}_{0.1}\text{FeAs}$. Средние размеры зерна оценены как $1 \times 2.5 \times 10 \text{ мкм}^3$.

зависимости сопротивления и высокочастотной восприимчивости (рис. 2а и б, соответственно). Оба метода показали близкие значения параметров переходов для образцов с содержанием фтора $x = 0.06$, 0.08 и 0.1; температура начала перехода $T_c^{\text{on}} = 39$, 49 и

55 К; критическая температура на середине перехода $T_c^{\text{m}} = 36$, 44 и 53 К. Для исследования ММВП были выбраны образец $\text{SmO}_{0.9}\text{F}_{0.1}\text{FeAs}$, содержащий только сверхпроводящую фазу, и образцы $\text{SmO}_{0.92}\text{F}_{0.08}\text{FeAs}$ и $\text{SmO}_{0.94}\text{F}_{0.06}\text{FeAs}$, в которых ожидается сосуществование сверхпроводящей и магнитной фаз. Следует отметить, что переходы в сверхпроводящее состояние для всех образцов характеризуются перегибом примерно на 2/3 высоты перехода (рис. 2а и б). Природа возникновения данного перегиба связана с гранулярной структурой образцов и будет обсуждаться ниже.

Измерения ММВП проводились на стандартном спектрометре ЭПР X-диапазона с модуляцией магнитного поля с частотой 100 кГц и усилением сигнала с помощью синхронного усилителя. Для получения температур в диапазоне 10–60 К использовался криостат с регулируемым потоком газообразного гелия. Образец помещался в резонатор и охлаждался до температуры измерений ниже критической в нулевом магнитном поле. При непрерывной протяжке магнитного поля вверх до 7 кЭ и вниз до остаточного поля магнита регистрировался гистерезис ММВП при фиксированной температуре. Для анализа экспериментальных данных и получения количественной информации о параметрах сверхпроводника использовалось теоретическое описание с применением модели гистерезиса ММВП [6].

Распределение локального магнитного поля на поверхности сверхпроводящего образца при изменении внешнего магнитного поля регистрировалось с помощью сканирующего датчика Холла.

Поскольку кислородная атмосфера губительно воздействует на сверхпроводящие свойства $\text{SmO}_{1-x}\text{F}_x\text{FeAs}$, образцы были запаяны в стеклянные ампулы с чистым гелием. В экспериментах, где контакт с воздухом был неизбежен, время пребывания образцов на воздухе было сведено к минимуму (несколько минут).

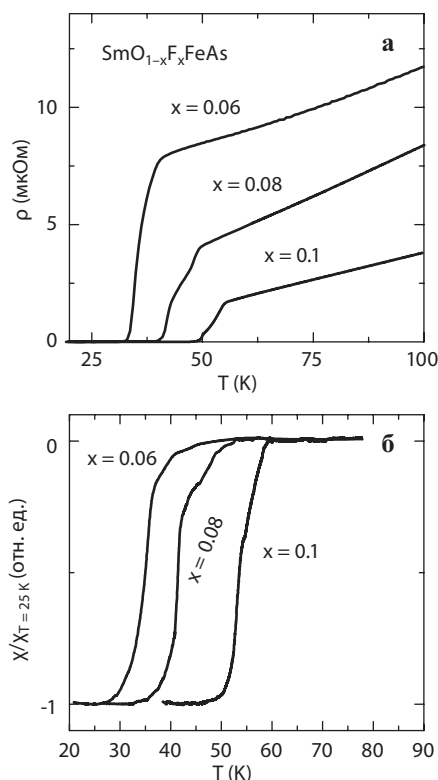


Рис. 2. Температурные зависимости сопротивления (а) и высокочастотной восприимчивости (б) для образцов $\text{SmO}_{1-x}\text{F}_x\text{FeAs}$ с различным содержанием фтора. Температуры начала переходов в сверхпроводящее состояние равны 39, 49 и 55 К для образцов с концентрацией фтора $x = 0.06$, 0.08 и 0.1, соответственно.

Результаты измерений ММВП

Петли гистерезиса ММВП регистрировались в широком диапазоне магнитных полей при разных температурах. Для примера на рис. 3 приведены три экспериментальные кривые, полученные для образца $\text{SmO}_{0.9}\text{F}_{0.1}\text{FeAs}$. Следует обратить внимание на то, что, наряду с сигналом ММВП, наблюдается паразитный сигнал ЭПР от стеклянной ампулы ($H \sim 1.6$ кЭ). При анализе амплитуды гистерезиса этот сигнал не учитывался. Согласно нашим данным, гистерезис появляется ниже температуры начала сверхпроводящего перехода T_c^{on} . Форма петли гистерезиса ММВП резко меняется при уменьшении температуры всего на несколько градусов. А именно, вблизи T_c^{on} петли гистерезиса ММВП практически симметричны относительно горизонтальной оси, а поле, при котором петля схлопывается и гистерезис исчезает (так называемое поле необратимости H_{irr}), достаточно мало. По мере дальнейшего охлаждения образца петля гистерезиса становится все более несимметричной за счёт возникновения низкополевого пика в поле до 1 кЭ при развёртке поля снизу вверх. При этом необратимое состояние сверхпроводника постепенно расширяется в сторону больших магнитных полей. При достижении определённой температуры ($T = 50.6$ К, рис. 3) поле необратимости становится больше 7 кЭ, и схлопывание петли уже не наблюдается ввиду ограниченности развёртки магнитного поля.

Форма гистерезиса ММВП зависит не только от величины магнитного поля, но меняется и с температурой. Из рис. 4 видно, что амплитуда низкополевого пика ММВП для образца $\text{SmO}_{0.94}\text{F}_{0.06}\text{FeAs}$ растёт при уменьшении температуры. Аналогичная тенденция отмечается и для амплитуды гистерезиса ММВП в высоких полях. Как будет показано ниже, анализ формы петли гистерезиса ММВП, её полевой и температурной зависимостей позволяет определить характер механизма пиннинга (объёмный или поверхностный). Следует отметить, что для образца $\text{SmO}_{0.92}\text{F}_{0.08}\text{FeAs}$ форма петли гистерезиса ММВП мало отличается от формы для двух других образцов, в то время как амплитуда низкополевого пика имеет промежуточное значение.

Сигнал ЭПР ($H \sim 1.6$ кЭ), хотя и является паразитным, приносит определённую пользу, так как позволяет отслеживать и устранять технический гистерезис вследствие задержки развёртки магнитного поля. Следует отметить, что в наших высококачественных образцах сигнал ЭПР от ионов железа, входящих в состав соединения, не наблюдается. В пниктидах железа d -электроны делокализованы. Быстрая спиновая релаксация за счёт сильного спин-орбитального взаимодействия приводит к сильному уширению линии ЭПР и невозможности обнаружить сигнал.

Эксперименты по измерению профиля магнитного потока на поверхности образца с помощью сканирующего датчика Холла проводились на образце $\text{SmO}_{0.92}\text{F}_{0.08}\text{FeAs}$. Они показали отсутствие распределения Бина по всему

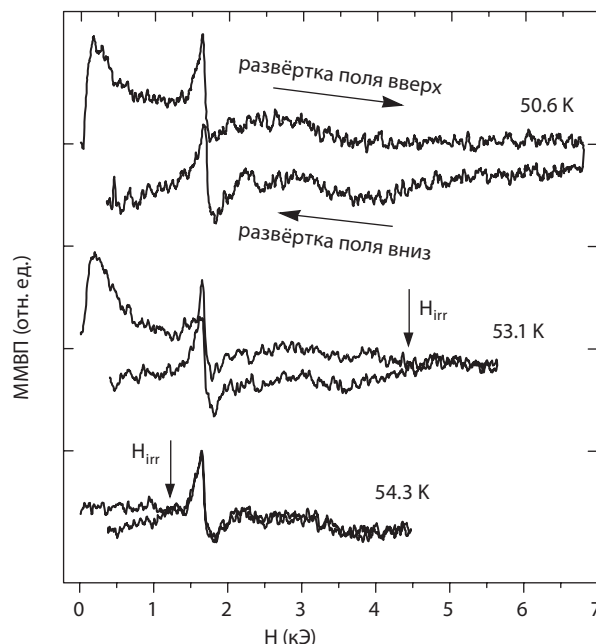


Рис. 3. Гистерезис ММВП, зарегистрированный для керамического образца $\text{SmO}_{0.9}\text{F}_{0.1}\text{FeAs}$ при различных температурах ниже T_c . Горизонтальная стрелка показывает направление развёртки поля. Вертикальная стрелка указывает положение поля необратимости H_{irr} .

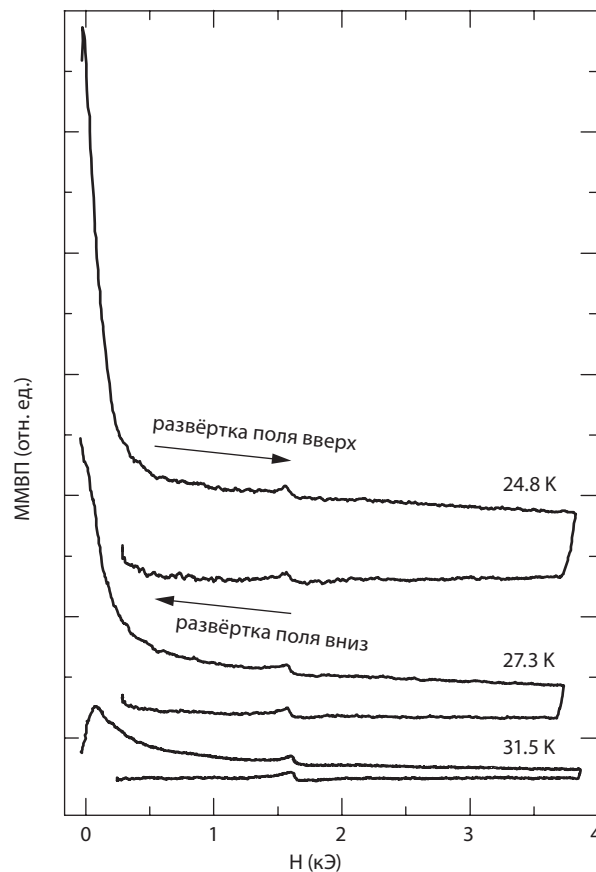


Рис. 4. Гистерезис ММВП, зарегистрированный для керамического образца $\text{SmO}_{0.94}\text{F}_{0.06}\text{FeAs}$ при различных температурах.

объёму образца. Это означает, что модель Бина применима на масштабах размеров зёрен. Таким образом, в расчётах плотности критического тока для трёх исследуемых образцов использовался средний поперечный размер отдельного зерна, который, по данным СЭМ, оценивался как 2.5 мкм.

Обсуждение результатов

При анализе полученных экспериментальных данных необходимо учитывать гранулярную структуру образцов. Сверхпроводящие зёрна отделены друг от друга несверхпроводящим материалом молекулярной толщины. При понижении температуры сверхпроводимость сначала устанавливается внутри сверхпроводящих зёрен. По мере дальнейшего охлаждения между зёрнами возникают слабые джозефсоновские связи. В результате экранирующий ток протекает уже по всему объёму образца. Таким образом, перегиб ниже T_c^{on} на зависимости $\rho(T)$ (рис. 2а) и $\chi(T)$ (рис. 2б) обусловлен переходом от режима установления сверхпроводимости внутри зёрен к режиму их объединения.

Кроме перегиба в сверхпроводящем переходе есть и другие проявления гранулярного строения образцов. Гранулярность определённым образом влияет на гистерезис ММВП. При температурах непосредственно ниже начала перехода T_c^{on} вклад в гистерезис даёт только объёмный пиннинг внутри зёрен, для которого характерны симметричные петли ММВП (кривая $T = 54.3$ К на рис. 3). При более низких температурах между зёрнами возникают слабые связи, что приводит к появлению джозефсоновских вихрей, которые пиннингуются в пространстве между зёрнами. При этом межзёрненный пиннинг поверхностного типа вносит вклад в гистерезис ММВП наряду с внутризёрненным пиннингом (кривые $T = 53.1$ и 50.6 К на рис. 3 и все кривые на рис. 4). Этот вклад проявляется в виде низкополевого пика, который искажает симметричную петлю ММВП (отсутствие пика при развёртке магнитного поля вниз связано с невозможностью довести его до 0 из-за остаточного поля магнита). Тот факт, что вклад от джозефсоновских вихрей наблюдается только в низких полях, объясняется разрывом слабых связей по мере увеличения внешнего магнитного поля [8]. Следует также отметить, что амплитуда низкополевого пика увеличивается с уменьшением температуры (рис. 4). Данная тенденция отражает температурную зависимость джозефсоновского тока между зёрнами, который растёт при понижении температуры [8].

Наряду с низкополевым пиком, возникающим вследствие межзёрненного пиннинга, петли ММВП характеризуются исчезновением гистерезиса при определённом значении магнитного поля, зависящего от температуры измерения. Такое поведение можно объяснить зависимостью гистерезиса ММВП от значения плотности критического тока, которая является убывающей функцией магнитного поля. Как только плотность критического тока становится

равной нулю при некотором значении магнитного поля H_{irr} , поведение сверхпроводника становится обратимым. Поскольку гистерезис исчезает при значениях поля существенно выше области наблюдения низкополевого пика, можно полагать, что поле необратимости образца H_{irr} определяется пиннингом внутри сверхпроводящих зёрен керамики. Зависимость $H_{irr}(T)$ называют линией необратимости (ЛН). Она является границей между областями с нулевой и ненулевой плотностью критического тока на фазовой диаграмме магнитных полей и температур.

ЛН образцов с различным содержанием фтора представлены на рис. 5а. Положение ЛН на фазовой диаграмме магнитных полей и температур определяется значениями критических параметров образцов, в частности, критической температурой T_c и содержанием сверхпроводящей фазы. Следует отметить, что необратимый режим для образцов с меньшей критической температурой T_c (меньшим содержанием фтора) устанавливается при более низких температурах.

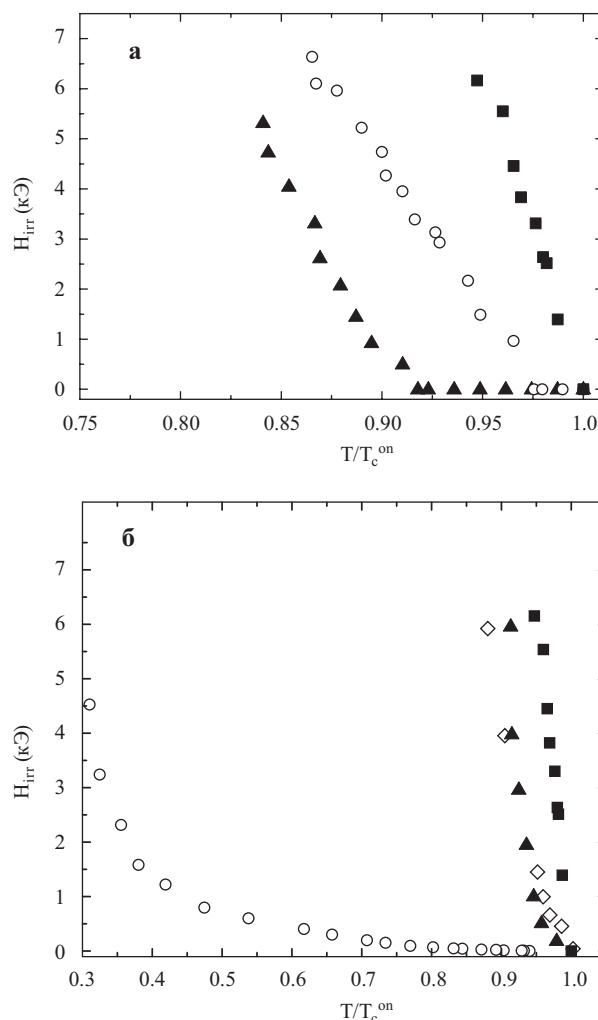


Рис. 5. а ЛН образцов $\text{SmO}_{1-x}\text{F}_x\text{FeAs}$, приведённые к температуре начала перехода: $\blacktriangle$, $x = 0.06$; $\circ$, $x = 0.08$; $\blacksquare$, $x = 0.1$. б ЛН керамических ВТСП соединений: $\blacksquare$, $\text{SmO}_{0.94}\text{F}_{0.06}\text{FeAs}$; $\blacktriangle$, YBCO [9]; $\diamond$, LSCO [10]; $\circ$, BSCCO [11].

Чтобы оценить силу пиннинга пниктидов, ЛН образца $\text{SmO}_{0.9}\text{F}_{0.1}\text{FeAs}$ сравнивалась с ЛН купратных ВТСП, а именно с керамиками $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$, $\text{La}_{1.85}\text{Sr}_{0.15}\text{CuO}_4$, $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ (рис. 5б). Поскольку эти соединения имеют разные критические температуры T_c , сравнение проводилось в масштабе приведённых температур $T/T_c^{\text{он}}$. Следует отметить, что наблюдаемый у пниктидов наклон ЛН сравним или даже круче, чем у соединения $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ [9]. Известно, что керамика $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ обладает наибольшей силой пиннинга среди всех купратных соединений ВТСП. Даже образцы $\text{La}_{1.85}\text{Sr}_{0.15}\text{CuO}_4$ [10] характеризуются более слабой зависимостью $H_{\text{ит}}(T)$, в то время как ЛН керамики $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ [11] весьма пологая, особенно вблизи T_c . Выявленная тенденция свидетельствует в пользу сильного пиннинга в пниктидах $\text{SmO}_{1-x}\text{F}_x\text{FeAs}$.

Помимо ЛН, из результатов измерений ММВП можно извлечь другие важные характеристики сверхпроводника. Следует сразу оговориться, что анализ межзёрненного пиннинга, который зависит от способа приготовления образца и содержит мало информации о самом веществе, выходит за рамки настоящей работы.

В общем случае, гистерезис ММВП является сложной функцией плотности критического тока j_c , вязкости вихревой материи η , отношения амплитуды тепловых флуктуаций к среднему расстоянию между центрами пиннинга $\langle u^2 \rangle / a^2$, и мгновенных распределений магнитных полей $H(r, t)$ и токов $j(r, t)$. Чтобы оценить эти параметры, необходимо привлечь соответствующую теоретическую модель, предложенную К. Кесслером [12] и развитую Т. Шапошниковой [6, 7]. В рамках этой модели, решая уравнения движения вихревой нити, можно получить выражение для мощности, поглощаемой вихрями при изменении магнитного поля. Результаты расчётов, полученных в работах [6, 7, 13], применялись для численного моделирования петель гистерезиса ММВП образцов пниктидов железа. Результат моделирования одной из петель гистерезиса показан на рис. 6 пунктирной линией.

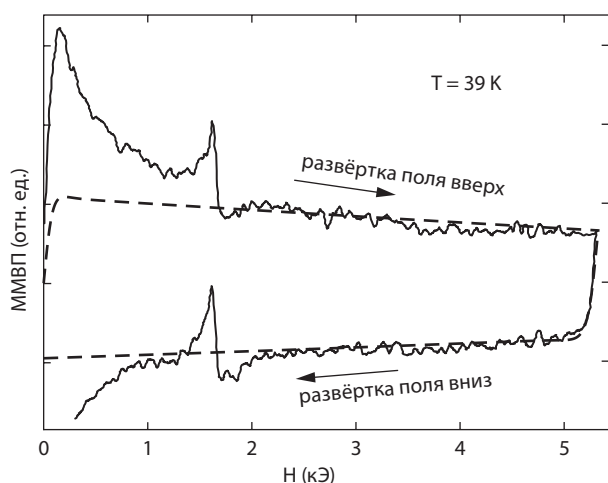


Рис. 6. Экспериментальная (сплошная линия) и теоретическая (пунктирная линия) петли ММВП для образца $\text{SmO}_{0.92}\text{F}_{0.08}\text{FeAs}$ при $T = 39$ К.

Расхождение экспериментальной и теоретической кривых в области низких полей связано с пренебрежением в расчётах вкладом от межзёрненного пиннинга.

Кроме моделирования петли гистерезиса для количественной оценки сверхпроводящих параметров анализировались температурные зависимости амплитуды гистерезиса ММВП L при фиксированном значении поля. На рис. 7 приведены зависимости $L(T)$ для образцов с различным содержанием фтора, полученные при $H = 2$ кЭ. Амплитуда гистерезиса определялась из экспериментальных петель ММВП как разница значений поглощаемой мощности при развёртке поля вверх ($P_{\text{вверх}}$) и

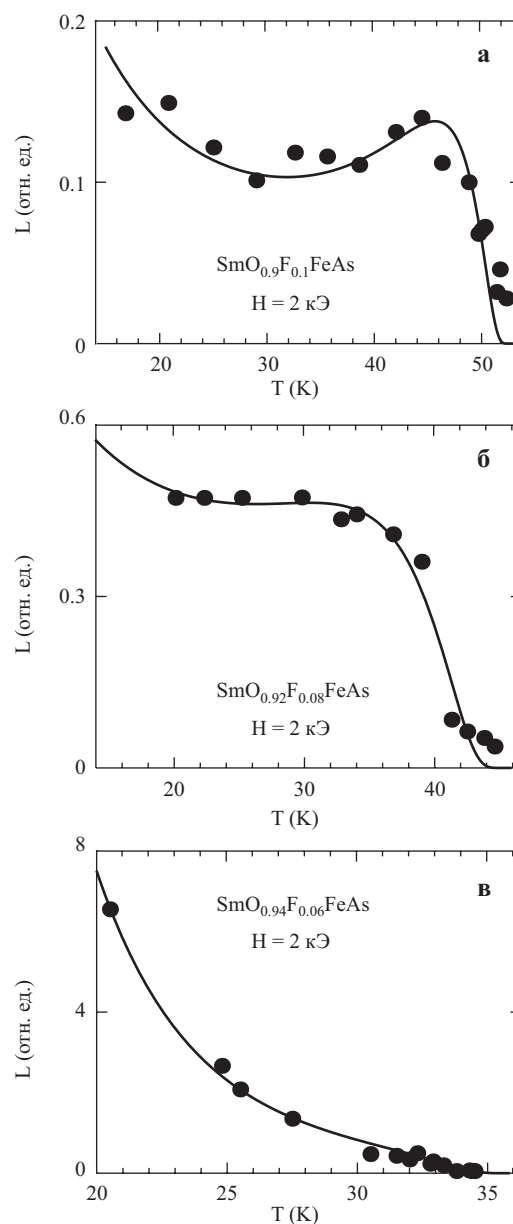


Рис. 7. Температурная зависимость амплитуды гистерезиса ММВП при внешнем магнитном поле $H = 2$ кЭ для образцов $\text{SmO}_{1-x}\text{F}_x\text{FeAs}$ с разным уровнем допирования фтором: $x = 0.1$ (а), $x = 0.08$ (б), $x = 0.06$ (в). Сплошная линия, результат численного моделирования; символы, экспериментальные данные.

вниз ($P_{\text{вниз}}$). Теоретически амплитуду гистерезиса ММВП можно описать следующим выражением [13]:

$$L = P_{\text{верх}} - P_{\text{вниз}} = A \frac{j_c^2(H, T)}{\eta^{7/2}(T)} \exp\left(-\frac{8\pi^2 \langle u^2(T) \rangle}{a^2}\right) \times [F_{\text{верх}}(H, j, j_c) - F_{\text{вниз}}(H, j, j_c)], \quad (1)$$

где A – константа, зависящая от настроек спектрометра; $F_{\text{верх}}$ и $F_{\text{вниз}}$ – интегралы, учитывающие мгновенные распределения полей и токов. Аналитические выражения для интегралов $F_{\text{верх}}$ и $F_{\text{вниз}}$ приведены в работе [13], в то время как мгновенные распределения полей и токов взяты из статьи [14]. Интегралы $F_{\text{верх}}$ и $F_{\text{вниз}}$, содержащие плотность критического тока как параметр, определяют форму петли ММВП, а прединтегральный коэффициент задаёт размах петли. Уравнение (1) содержит три параметра, описывающих свойства сверхпроводящего состояния: плотность критического тока j_c , отношение амплитуды тепловых флуктуаций u к среднему расстоянию a между центрами пиннинга $\langle u^2 \rangle / a^2$, а также вязкость вихревой материи η .

Как видно из рис. 7, температурная зависимость амплитуды ММВП различна для трёх исследуемых образцов. В зависимости для образца $\text{SmO}_{0.9}\text{F}_{0.1}\text{FeAs}$ существует локальный максимум вблизи $T = 45$ К, который исчезает с увеличением концентрации фтора. Различия в поведении $L(T)$ для разных образцов, а также сложный немонокотонный характер этой зависимости объясняются тем, что параметры j_c , η и $\langle u^2 \rangle / a^2$ отличаются по величине и по-разному зависят от температуры. Температурные зависимости этих параметров имеют следующий вид:

$$j_c = j_{c0} \left(1 - \frac{T}{T_c}\right), \quad (2)$$

$$\eta = \eta_0 \frac{1 - (T/T_c)^2}{1 + (T/T_c)^2}, \quad (3)$$

$$\langle u^2 \rangle / a^2 = CT. \quad (4)$$

Здесь j_{c0} и η_0 – соответственно плотность критического тока и вязкость вихревой материи при абсолютном нуле, а C – константа, зависящая от материала. Вышеприведённые зависимости были установлены эмпирически. Уравнение (2) описывает температурную зависимость плотности критического тока, характерную для керамических ВТСП [15]. Уменьшающаяся функция температуры отражает тот факт, что сила пиннинга ослабевает при тепловой активации вихрей. Температурная зависимость вязкости [уравнение (3)] получена из эмпирического соотношения для второго критического поля B_{c2} . Вязкость вихревой материи характеризует рассеяние куперовских пар на нормальной сердцевине при движении вихря и аналитически выражается как $\eta = \Phi_0 B_{c2} / \rho_n$ [16] (Φ_0 – квант магнитного потока $2.07 \cdot 10^{-7}$ Гс $\cdot$ см², ρ_n – сопротивление в нормальном

состоянии). Среднеквадратичное отклонение положения вихря под действием тепловых флуктуаций $\langle u^2 \rangle = 4\pi T \lambda^2 / \Phi_0^{3/2} B^{1/2}$ [17] прямо пропорционально температуре.

Подставляя уравнения (2)–(4) в уравнение (1), можно проанализировать вклад каждого параметра в температурную зависимость амплитуды гистерезиса ММВП. Поскольку плотность критического тока представляет собой линейную функцию температуры для керамических образцов [15], её влияние сводится к постепенному уменьшению амплитуды гистерезиса с увеличением температуры вплоть до T_c . Отношение $\langle u^2 \rangle / a^2$ входит в уравнение (1) экспоненциально и с отрицательным знаком, и, поскольку амплитуда тепловых флуктуаций $(\langle u^2 \rangle)^{1/2}$ растёт с температурой, амплитуда гистерезиса $L(T)$ существенно подавляется вблизи T_c . Таким образом, вязкость вихревой материи – единственный параметр, который может привести к увеличению амплитуды ММВП вблизи T_c . Это означает, что локальный максимум, наблюдаемый в температурной зависимости амплитуды гистерезиса образца $\text{SmO}_{0.9}\text{F}_{0.1}\text{FeAs}$, возникает из-за противоположно действующих вкладов $\eta(T)$ и $j_c(T)$, $\langle u^2(T) \rangle$. К сожалению, оценить параметр вязкости количественно не удалось, поскольку этот параметр явно входит в предэкспоненциальный множитель уравнения (1), который, в свою очередь, зависит от настроек спектрометра (параметр A) и меняется в разных сериях экспериментов. Тем не менее, качественный анализ с помощью уравнений (1)–(4) даёт некоторое представление о процессах, вносящих вклад в температурную зависимость амплитуды гистерезиса ММВП.

Чтобы найти зависимость плотности критического тока от магнитного поля, процедура подгонки теоретической кривой $L(T, H = \text{const})$ к экспериментальным данным повторялась при нескольких значениях магнитного поля. На рис. 8 представлены оценки плотности критического тока для каждого образца при $T = 25$ К и разных значениях полей. Наблюдается следующая тенденция: чем меньше

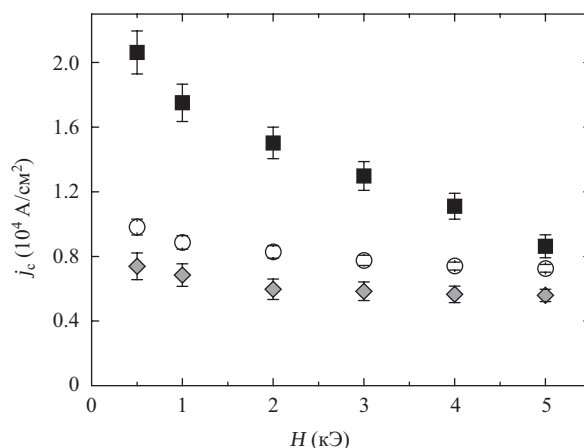


Рис. 8. Зависимость плотности критического тока j_c от магнитного поля при $T = 25$ К для образцов $\text{SmO}_{1-x}\text{F}_x\text{FeAs}$ с разным уровнем допирования фтором: $\circ$, $x = 0.06$; $\diamond$, $x = 0.08$; $\blacksquare$, $x = 0.1$.

концентрация фтора в образце, тем слабее зависимость плотности критического тока от магнитного поля. Данное наблюдение указывает на наличие дополнительных центров пиннинга в образцах с меньшей концентрацией фтора $x = 0.06$ и 0.08 по сравнению с образцом с большей концентрацией фтора $x = 0.1$. Можно предположить, что наноразмерные включения несверхпроводящей (возможно магнитной) фазы могут выступать в качестве таких центров пиннинга. Немонотонная зависимость плотности критического тока от содержания фтора, например, тот факт, что j_c у образца $\text{SmO}_{0.92}\text{F}_{0.08}\text{FeAs}$ немного меньше, чем j_c у образца $\text{SmO}_{0.94}\text{F}_{0.06}\text{FeAs}$, можно объяснить различным соотношением размеров несверхпроводящих включений и сердцевин вихрей. Очевидно, размеры несверхпроводящих включений достигают максимальной величины при минимальной концентрации фтора и уменьшаются по мере увеличения уровня допирования. В результате эффективность пиннинга также уменьшается по мере увеличения содержания фтора.

Предположение о больших размерах несверхпроводящих включений при наименьшем содержании фтора подтверждается оценками параметра $(\langle u^2 \rangle / a^2)^{1/2}$. Отношение амплитуды тепловых флуктуаций $(\langle u^2 \rangle)^{1/2}$ к среднему расстоянию a между центрами пиннинга было оценено при $T = 25$ К для образцов с содержанием фтора 0.06, 0.08 и 0.1, соответственно: $(\langle u^2 \rangle / a^2)^{1/2} = 0.36, 0.16$ и 0.19 . Очевидно, $\langle u^2 \rangle$ и a не зависят от величины приложенного магнитного поля. Значения $(\langle u^2 \rangle / a^2)^{1/2}$, полученные в результате расчётов при разных значениях магнитного поля, характеризуются разбросом в пределах ошибки вычислений, что указывает на правильное определение этого параметра в процессе моделирования. Если предположить, что параметр $(\langle u^2 \rangle)^{1/2}$ существенно не меняется при изменении концентрации фтора, то увеличение отношения $(\langle u^2 \rangle / a^2)^{1/2}$ у образца с минимальным содержанием фтора можно объяснить меньшим расстоянием между центрами пиннинга, а, следовательно, либо большим числом центров пиннинга, либо большими размерами включений.

Сильная полевая зависимость плотности критического тока у образца с большим содержанием фтора ($x = 0.1$) позволяет предположить, что в нём пиннинг обусловлен точечными центрами и носит коллективный характер. Большее абсолютное значение плотности критического тока для данного образца ($x = 0.1$) обусловлено его высокой критической температурой.

Заключение

Серия керамических образцов пниктида $\text{SmO}_{1-x}\text{F}_x\text{FeAs}$ с уровнями допирования фтором $x = 0.06, 0.08$ и 0.1 исследовалась методом ММВП. Гранулярная структура образцов проявляет себя как в температурных зависимостях высокочастотной восприимчивости и сопротивления, так и в гистерезисе ММВП. Вклад от межзёрненного пиннинга

ограничен областью малых полей, в то время как внутризёрненный пиннинг преобладает в высоких магнитных полях (более 1 кЭ) и определяет границу необратимости свойств сверхпроводника. Сверхпроводящие параметры, определённые из измерений ММВП непосредственно или с помощью моделирования, указывают на сильный пиннинг вихрей внутри зёрен, вплоть до T_c . В частности, резкий наклон линии необратимости пниктидов сравним по крутизне с керамикой $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$, которая характеризуется наибольшей силой пиннинга среди купратных ВТСП. Теоретический анализ петель ММВП позволил нам количественно оценить плотность критического тока. Образцы с низким содержанием фтора ($x = 0.06, 0.08$) демонстрируют слабую зависимость плотности критического тока от магнитного поля. Этот эффект можно связать с наличием наноразмерных, возможно магнитных, несверхпроводящих включений, сосуществующих со сверхпроводящей фазой, которые служат эффективными центрами пиннинга вихревых нитей.

Работа выполнена при поддержке DFG (436 RUS 113/936/0-1) и РФФИ (№ 08-02-91952-ННИО-а, № 10-02-01056). Авторы благодарят Г. Бера, А. Кондрата, К. Хесса, Н. Лепса, С. Вурмеля, Р. Клингелера, Б. Бюхнера за приготовление и характеризацию образцов.

Литература

1. Kamihara Y., Watanabe T., Hirano M., Hosono H.: J. Am. Chem. Soc. **130**, 3296–3297 (2008)
2. Blatter G., Feigelman M.V., Geshkenbein V.B., Larkin A.I., Vinokur V.M.: Rev. Mod. Phys. **66**, 1125–1388 (1994)
3. Hess C., Kondrat A., Narduzzo A., Hamann-Borrero J.E., Klingeler R., Werner J., Behr G., Büchner B.: Europhys. Lett. **87**, 17005(1-5) (2009)
4. Drew A.J., Niedermayer Ch., Baker P.J., Pratt F.L., Blundell S.J., Lancaster T., Liu R.H., Wu G., Chen X.H., Watanabe I., Malik V.K., Dubroka A., Rössle M., Kim K.W., Baines C., Bernhard C.: Nat. Mater. **8**, 310–314 (2009)
5. Owens F.J., Poole C.P. (Jr.): Electromagnetic absorption in the copper oxide superconductors. Dordrecht: Kluwer Academic 1999. 200 p.
6. Shaposhnikova T., Talanov Yu., Vashakidze Yu.: Physica C **385**, 383–392 (2003)
7. Shaposhnikova T., Vashakidze Yu., Khasanov R., Talanov Yu.: Physica C **300**, 239–249 (1998)
8. Tinkham M.: Introduction to superconductivity. 2nd edn. New York: McGraw-Hill 1996. 219 p.
9. Rodrigues P. (Jr.), Schaf J., Pureur P.: Phys. Rev. B **49**, 15292–15298 (1994)
10. Fan X., Terasawa M., Mitamura T., Kohara T., Ueda K., Tsubakino H., Fukushima K., Takezawa N.: Physica C **282-287**, 2105–2106 (1997)
11. Schilling A., Jin R., Guo J.D., Ott H.R.: Phys. Rev. Lett. **71**, 1899–1902 (1993)
12. Kessler C., Nebendahl B., Peligrad D.-N., Dulcic A., Habermeyer H.-U., Mehling M.: Physica C **219**, 233–240 (1994)
13. Talanov Yu.: Studies of high temperature superconductors (Narlikar A.V., ed.), vol. 49, p. 169. New York: Nova Science 2005.
14. Brandt E.H.: Phys. Rev. B **54**, 4246–4264 (1996)
15. Darhmaoui H., Jung J.: Phys. Rev. B **53**, 14621–14630 (1996)
16. Bardeen J., Stephen M.J.: Phys. Rev. **140**, 1197–1207 (1965)
17. Feigelman M.V., Vinokur V.M.: Phys. Rev. B **41**, 8986–8990 (1990)

Преобразование однофотонных волновых пакетов в устройствах квантовой памяти с помощью перестраиваемого резонатора

А. А. Калачёв

Лаборатория нелинейной оптики

Определены оптимальные условия преобразования временной формы одиночных фотонов, генерируемых в режиме спонтанного параметрического рассеяния света в резонаторе, с помощью устройства оптической квантовой памяти, в котором запись и воспроизведение однофотонных состояний осуществляется посредством перестраиваемого резонатора.

Введение

Использование фотонов в качестве носителей квантовой информации предполагает создание эффективных источников чистых однофотонных состояний электромагнитного поля. Одним из самых простых методов приготовления таких состояний является процесс спонтанного параметрического рассеяния (СПР) света в нелинейном кристалле [1, 2]. Корреляция между фотонами рассеянного поля позволяет с высокой вероятностью предсказывать существование одного из рассеянных фотонов путём детектирования другого фотона в рождающихся парах. Однако простейшая схема однофотонного источника на основе СПР обладает ограниченными возможностями. Во-первых, типичная спектральная ширина поля СПР, определяемая условием фазового синхронизма, получается порядка нескольких терагерц, что приводит к низкой спектральной яркости однофотонного источника и снижает вероятность взаимодействия генерируемых фотонов с атомными системами (квантовой памятью), где требуется спектральная ширина порядка 10–100 МГц. Во-вторых, для некоторых приложений квантовой информатики желательна генерация однофотонных волновых пакетов с контролируемой временной формой. Например, гауссовы импульсы обладают оптимальной формой с точки зрения устойчивости оптической квантовой схемы к рассогласованию во времени [3], возрастающие экспоненциальные импульсы и импульсы с более сложной формой являются оптимальными с точки зрения взаимодействия с атомными системами [4, 5] и т.д. Для сужения спектра СПР с одновременным увеличением скорости генерации фотонов в единицу спектрального интервала можно поместить нелинейную среду в резонатор, который действует как активный фильтр [6–11]. Фактически, речь идёт об использовании параметрического генератора света (ПГС) с накачкой намного ниже порога генерации. Что касается управления формой результирующих однофотонных импульсов, то одним из возможных способов является использование амплитудных и фазовых модуляторов на

выходе однофотонного источника [12]. Однако амплитудная модуляция на выходе приводит к дополнительным потерям, т.е. к уменьшению эффективности условного приготовления однофотонных состояний, что равносильно увеличению эффективной скорости темновых фотоотсчётов детектора. С этой точки зрения более выгодным является использование устройства оптической квантовой памяти, в котором генерируемый однофотонный волновой пакет сначала записывается, а потом воспроизводится с нужной временной формой. Для преобразования однофотонных состояний, которые можно приготовить в ПГС с накачкой ниже порога генерации, наиболее подходящей оказывается схема оптической квантовой памяти с перестраиваемым резонатором [13–15]. В работах [13, 14] была разработана процедура записи и воспроизведения симметричных экспоненциальных импульсов света, которая затем была обобщена на случай гауссовых импульсов [15]. В настоящей работе анализируются возможности использования данного метода для преобразования временной формы однофотонных волновых пакетов.

Генерация однофотонных состояний в режиме спонтанного параметрического рассеяния света в резонаторе

В процессе СПР плоская волна накачки возбуждает квадратично нелинейный кристалл, в котором случайным образом (с эффективностью порядка 10^{-7} – 10^{-11}) происходит уничтожение высокочастотного фотона накачки и одновременное рождение двух низкочастотных фотонов, называемых, обычно, холостым и сигнальным. При определённой ориентации оптической оси кристалла такие коррелированные фотоны (бифотоны) могут испускаться коллинеарно, в том же направлении, что и излучение накачки, и иметь одинаковые несущие частоты, которые в два раза меньше частоты поля накачки. Тогда вектор состояния бифотонного поля на выходе из кристалла можно записать следующим образом [16–19]:

$$|\psi\rangle = |0\rangle + \int_{-\infty}^{+\infty} d\Omega F(\Omega) |\omega_0 + \Omega\rangle_s |\omega_0 - \Omega\rangle_i, \quad (1)$$

где $|\omega_0 \pm \Omega\rangle_{s,i}$ – однофотонные состояния мод сигнального (s) и холостого (i) полей с частотами $\omega_0 \pm \Omega$; ω_0 – центральная частота рассеянного поля, равная половине частоты поля накачки. Функция $F(\Omega)$, называемая спектральной амплитудой бифотона, зависит от спектральных свойств поля накачки, дисперсионных свойств нелинейной среды и типа фазового синхронизма.

Теперь предположим, что нелинейная среда помещается в резонатор, оба зеркала которого являются прозрачными на частоте волны накачки и высоко отражающими на частотах рассеянного света. Для простоты ограничимся рассмотрением одной продольной моды резонатора, частота которой равна ω_0 , предполагая, что на выходе или внутри резонатора установлен частотный фильтр, полоса пропускания которого много больше спектральной ширины моды, но меньше межмодового расстояния. Рассматривая процесс СПР, разумно сразу предположить, что вероятность двухфотонного распада за время жизни фотона в резонаторе мала, что соответствует накачке ПГС существенно ниже порога генерации. Тогда влияние резонатора на процесс СПР приводит к появлению в формуле (1) множителей, учитывающих известные соотношения “вход-выход” для резонатора [20]:

$$|\psi\rangle = |0\rangle + \int_{-\infty}^{+\infty} d\Omega F(\Omega) D_s(\Omega) D_i(-\Omega) \times |\omega_0 + \Omega\rangle_s |\omega_0 - \Omega\rangle_i, \quad (2)$$

где $D(\Omega) \propto (\Gamma)^{1/2}(\Omega + i\Gamma/2)^{-1}$ при наличии резонатора и $D(\Omega) = 1$ в отсутствии резонатора, Γ – спектральная ширина моды резонатора. Наличие или отсутствие резонатора для сигнального и холостого полей, имеющих ортогональную поляризацию в случае СПР типа II, можно контролировать при помощи поляризационного светоделителя, устанавливаемого внутри резонатора.

Амплитуда плотности вероятности зарегистрировать сигнальный и холостой фотоны в моменты времени t_s и t_i , соответственно, на выходе из кристалла (резонатора) вычисляется по формуле:

$$\Phi(t_s, t_i) \equiv \langle t_s | \langle t_i | \Psi \rangle = \int d\Omega \exp(-i\Omega(t_s - t_i)) \times \langle 0 | a_s(\omega_0 + \Omega) a_i(\omega_0 - \Omega) | \psi \rangle, \quad (3)$$

где $|t\rangle = \int d\Omega \exp(i\Omega t) |\Omega\rangle$. Поскольку спектральная ширина моды резонатора предполагается существенно меньше спектральной ширины СПР без резонатора, функцию $F(\Omega)$ можно считать постоянной в пределах области интегрирования, определяемой функцией $D(\Omega)$. В результате, формула (3) сводится к Фурье-преобразованию произведения $D_i(\Omega) D_s(-\Omega)$, что даёт

$$\Phi(t_s, t_i) \propto \exp(-\Gamma(t_s + t_i)/2) \exp(-\Gamma|t_s - t_i|/2). \quad (4)$$

Зная амплитуду двухфотонного состояния, можно вычислить амплитуду $F(t)$ однофотонного волнового пакета $\int F(t)|t\rangle dt$ ($\int |F(t)|^2 dt = 1$), которая получается в результате детектирования одного из коррелированных фотонов в некоторый момент времени. В случае двухрезонаторного ПГС, второй фотон имеет вид симметричного биэкспоненциального импульса, максимум которого приходится на момент детектирования, а полуширина определяется временем жизни фотона в резонаторе [8]. В случае однорезонаторного ПГС второй фотон будет иметь вид одностороннего экспоненциального импульса [9]. При этом, если резонанс имеет место для поля, соответствующего детектируемому фотону, то амплитуда второго фотона получается возрастающей во времени и достигающей максимального значения к моменту детектирования.

Преобразование формы однофотонных волновых пакетов

В работах [13–15] разработан метод записи и воспроизведения однофотонных состояний света в устройствах квантовой памяти, носителями информации в которых являются оптически тонкие резонансные среды, находящиеся в резонаторе. Перестройка резонатора позволяет управлять константой связи атомов с полем, что приводит к изменению скорости поглощения или спонтанного излучения. В простейшем случае для этого можно использовать ступенчатую модуляцию: взаимодействие выключается после поглощения резонансного светового импульса и включается перед его излучением за счёт скачкообразной перестройки резонатора (минимальная длительность перестройки добротности определяется временем жизни фотона в резонаторе). В этом случае оптимальная форма входного импульса, ведущая к максимальной эффективности записи, является возрастающей экспоненциальной: $F_{\text{вх}}(t) = F_{\text{вх}}^0 \exp(\gamma(C_m + 1)t)$, $t \leq 0$, а выходной импульс является обращённой во времени копией входного импульса. Здесь γ – скорость спонтанного излучения; C_m – максимальное значение кооперативного параметра, достигаемое при точном совпадении частот атомного перехода и линии резонатора и равное оптической толщине среды, помноженной на число обходов резонатора, совершаемых в течение времени жизни фотона в резонаторе. Эффективность процедуры записи (считывания) определяется как отношение энергии, запасённой в среде, к энергии входного импульса (энергии выходного импульса к энергии, запасённой в среде) и получается равной $N_{\text{эсп}} = C_m/(C_m + 1)$ [5, 13]. Более того, используя перестраиваемый резонатор можно записывать и воспроизводить симметричные во времени однофотонные волновые пакеты с эффективностью, близкой к единице. В частности, для гауссовых импульсов вида $F_{\text{вх}}(t) = F_{\text{вх}}^0 \exp(-R(t + 1)^2)$, $t \leq 0$, эффективность записи или считывания при $C_m \gg 1$ оказывается равной $N_{\text{гаусс}} \approx 1 - 3\sqrt{2w(C_m/6\sqrt{2\pi})}/C_m$ [15], где $w(x)$ – главная вещественная ветвь функции Ламберта.

Преимуществом схемы является то, что процедуры записи и воспроизведения квантовых состояний можно, в принципе, осуществить без использования дополнительных внешних полей и импульсов, действующих непосредственно на атомную систему, что упрощает реализацию и делает возможным использование трудно контролируемых материалов. С другой стороны, без переноса возбуждения на долгоживущие атомные уровни время хранения записанной информации ограничено временем фазовой релаксации в среде, которое в примесных кристаллах при низких температурах не превышает нескольких миллисекунд. Таким образом, данная схема подходит для тех случаев, когда не требуется длительного хранения информации, в частности, для преобразования формы однофотонных волновых пакетов в источниках однофотонных состояний.

Пусть, для определённости, ПГС усиливает поле холостой волны, так что выходящий из него холостой фотон направляется на детектор, а сигнальный – в устройство квантовой памяти с перестраиваемым резонатором. Как только произошло детектирование холостого фотона, можно сказать, что с вероятностью $C_m/(1 + C_m)$ произошло поглощение сигнального фотона в резонансной среде. Для преобразования его временной формы необходимо, прежде всего, скачкообразным образом уменьшить добротность резонатора в устройстве квантовой памяти, что соответствует записи информации, и затем перестраивать резонатор по определённому закону, что приведёт к испусканию фотона с нужной временной формой. В случае гауссовой формы полная эффективность преобразования получается равной

$$N = N_{\text{экс}} N_{\text{гаусс}} \approx 1 - \frac{1}{C_m} - \frac{3\sqrt{2}}{C_m} \sqrt{w \left(\frac{C_m}{6\sqrt{2}\pi} \right)}, \quad (5)$$

при $C_m \gg 1$. Аналогичным образом, можно преобразовывать форму однофотонных импульсов, испускаемых двухрезонаторным ПГС. В этом случае не требуется скачкообразной перестройки резонатора при записи, однако его добротность должна модулироваться в течение всего взаимодействия сигнального фотона с атомной системой [13], что требует дополнительной задержки сигнального фотона относительно холостого. Кроме того, в случае биэкспонциальных импульсов на входе квантовой памяти общие потери возрастают приблизительно в два раза, пропорционально временному интервалу между максимумами входного и выходного импульсов.

Наконец, сравним эффективность преобразования, осуществляемого с помощью перестраиваемого резонатора, с эффективностью преобразования на основе других схем квантовой памяти. Для анализа последних можно воспользоваться результатами работ [4, 5]. Если запись и считывание осуществляется с использованием оптически толстой среды без резонатора, то максимальная эффективность преобразования получается равной $N \approx 1 - 10.6/C$, где C – оптическая толщина среды – параметр, равносильный C_m . При этом записываются и высвечиваются

асимметричные импульсы, форма которых оптимизирована для достижения максимальной эффективности. Если необходимо получить на выходе симметричный импульс, то эффективность, естественно, снижается. Таким образом, приготовление симметричных однофотонных волновых пакетов с помощью перестраиваемого резонатора является оптимальным, по крайней мере, в том случае, когда речь идёт об узкополосных однофотонных импульсах, генерируемых в процессе СПР в резонаторе.

Заключение

Показано, что схема квантовой памяти на основе перестраиваемого резонатора естественным образом объединяется со схемой приготовления однофотонных состояний в ПГС, позволяя создавать эффективные источники однофотонных импульсов с контролируемой временной формой. Наибольшая эффективность условного приготовления однофотонных состояний достигается при использовании однорезонаторного ПГС, когда генерируемые фотоны имеют вид возрастающих экспоненциальных импульсов и поглощаются устройством квантовой памяти с максимально возможной вероятностью.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 09-02-00206-а) и Программы Президиума РАН “Квантовая физика конденсированных сред”.

Литература

1. Клышко Д.Н.: Квантовая электроника **4**, 1056–1060 (1977)
2. Hong C.K., Mandel L.: Phys. Rev. Lett. **56**, 58–60 (1986)
3. Rohde P.P., Ralph T.C., Nielsen M.A.: Phys. Rev. A **72**, 052332(1-6) (2005)
4. Gorshkov A.V., André A., Fleischhauer M., Sørensen A.S., Lukin M.D.: Phys. Rev. Lett. **98**, 123601(1-4) (2007)
5. Gorshkov A.V., André A., Lukin M.D., Sørensen A.S.: Phys. Rev. A **76**, 033804(1-15), 033805(1-25), 033806(1-13) (2007)
6. Ou Z.Y., Lu Y.J.: Phys. Rev. Lett. **83**, 2556–2559 (1999)
7. Lu Y.J., Ou Z.Y.: Phys. Rev. A **62**, 033804(1-11) (2000)
8. Neergaard-Nielsen J.S., Melholt Nielsen B., Takahashi H., Vistnes A.I., Polzik E.S.: Opt. Express **15**, 7940–7949 (2007)
9. Scholz M., Wolfgramm F., Herzog U., Benson O.: Appl. Phys. Lett. **91**, 91104(1-3) (2007)
10. Nielsen B.M., Neergaard-Nielsen J.S., Polzik E.S.: Opt. Lett. **34**, 3872–3874 (2009)
11. Scholz M., Koch L., Benson O.: Phys. Rev. Lett. **102**, 063603(1-4) (2009)
12. Kolchin P., Belthangady C., Du S., Yin G.Y., Harris S.E.: Phys. Rev. Lett. **101**, 103601(1-4) (2008)
13. Kalachev A.: Phys. Rev. A **78**, 043812(1-6) (2008)
14. Калачёв А.А.: Казанский физико-технический институт имени Е. К. Завойского 2008. Ежегодник, с. 144–147. Казань: ФизтехПресс 2009.
15. Калачёв А.А.: Оптика и спектроскопия **108** (2010), в печати.
16. Belinsky A.V., Klyshko D.N.: Laser Phys. **4**, 663–689 (1994)
17. Rubin M.H., Klyshko D.N., Shih Y.H., Sergienko A.V.: Phys. Rev. A **50**, 5122–5133 (1994)
18. Keller T.E., Rubin M.: Phys. Rev. A **56**, 1534–1541 (1997)
19. Grice W.P., Walmsley I.A.: Phys. Rev. A **56**, 1627–1634 (1997)
20. Collett M.J., Gardiner C.W.: Phys. Rev. A **30**, 1386–1391 (1984)

Оптическая спектроскопия на основе некогерентного фотонного эха

К. Р. Каримуллин, В. В. Самарцев

Лаборатория нелинейной оптики

Методом четырёхволнового смешения с использованием некогерентного лазерного источника исследована динамика оптических спектров примесных центров (органических молекул) в неупорядоченных матрицах. Развита методика зондовой спектроскопии аморфных сред в режиме некогерентного фотонного эха, позволяющая исследовать процессы оптической дефазировки при высоких (вплоть до комнатной) температурах. Исследованы при комнатной температуре процессы сверхбыстрой оптической дефазировки молекул-хромофоров, внедрённых в матрицы аморфных полимеров, установлены механизмы и измерены времена фазовой релаксации.

Введение

В последнее время объектами исследования всё чаще становятся сложные молекулярные соединения: разнообразные полимеры, органические стёкла, аморфные полупроводники, а также многочисленные биологические среды. Аморфные органические вещества являются перспективными объектами для создания новых материалов и приборов. Изучение и синтез подобных структур с заданными свойствами являются важными направлениями современной науки и техники. Большинство нанообъектов, наноструктур органической природы и метаматериалов также относятся к неупорядоченным средам. Повсеместное использование на практике и необходимость в разработке новых материалов на основе неупорядоченных органических веществ делает актуальным глубокое изучение их фундаментальных свойств. Практически все характеристики, такие как коэффициенты упругости, теплопроводности и теплоёмкости, восприимчивости к различным внешним воздействиям и другие параметры, не могут быть объяснены без привлечения информации о внутренней динамике вещества. Немаловажной является проблема изучения быстропротекающих процессов в аморфных средах, таких как растворение, полимеризация, внутренние колебания и переориентация молекул, различные биохимические процессы и реакции. В данной работе динамика неупорядоченных сред (полимеров) на микроскопическом уровне исследуется при помощи методики оптической спектроскопии некогерентного фотонного эха (НФЭ). Примесные центры, а именно — хромофорные молекулы, на электронных переходах которых возбуждаются сигналы фотонного эха (ФЭ), внедряются в малой концентрации в аморфные матрицы и играют роль чувствительных спектральных зондов.

Спектроскопия аморфных сред

Сложные органические молекулы поглощают фотоны видимой (а также ИК и УФ) части спектрального диа-

пазона, благодаря чему в различных исследованиях становится возможным использование методов оптической спектроскопии. При изучении аморфных конденсированных сред оптические спектры значительно усложняются межатомными и межмолекулярными взаимодействиями. Слабовыраженная структура спектров становится основной проблемой, затрудняющей применение спектроскопических методов в исследованиях таких сред. Электрон-фононное взаимодействие приводит к тому, что при изменении электронного состояния молекулы возникают межмолекулярные колебания, вследствие чего в спектре наблюдаются отдельные линии. В силу огромного количества частот межмолекулярных колебаний одновременно возбуждается множество электрон-фононных переходов, которые непрерывно заполняют широкий участок спектра, сливаясь в широкую полосу. Уширение, возникающее вследствие этого, является однородным. Оно свойственно оптическому спектру даже единственного примесного центра. Однородно-уширенный спектр активного центра выглядит как совокупность узкого пика и широкого спада (крыла). Узкая линия, которую называют бесфононной линией (БФЛ), соответствует переходам без рождения или уничтожения фононов, а широкая полоса, называемая фононным крылом, состоит из слившихся электрон-фононных линий. БФЛ, как правило, наблюдается только при криогенных температурах, исчезая при повышении температуры. Неоднородное уширение, в отличие от однородного, возникает только в ансамбле примесных молекул. В полимерах и стёклах, характеризующихся сильным структурным разупорядочением, каждая примесная молекула в аморфной матрице обладает разным локальным окружением. Взаимодействие примеси с ближайшими атомами локального окружения влияет на энергию электронного возбуждения примеси, то есть на частоту излучаемого фотона. Поэтому ансамбль примесных молекул будет испускать фотоны различных частот в силу сильных различий в локальном окружении каждой молекулы, и в результате будет наблюдаться широкая спектральная полоса. Неоднородное уширение ограничивает спектральное разрешение, резко уменьшая информативность оптической спектроскопии

и затрудняя определение структурных и динамических параметров неупорядоченных веществ. Именно по этой причине основными методами спектроскопии аморфных сред являются методы, связанные с полным или частичным “снятием” неоднородного уширения в сочетании с возможностью увеличить спектральное разрешение и использовать преимущества селективной спектроскопии (за счёт использования узкополосных лазеров). К таким методам относятся: селективное возбуждение тонкоструктурных спектров флуоресценции, выжигание спектральных провалов и ФЭ. Указанные техники реализуют спектроскопию высокого разрешения, позволяя определять такие параметры, как расщепления кристаллических полей, электрические и магнитные дипольные моменты и характерные времена затухания флуоресценции. Методика ФЭ [1, 2] даёт возможность прямого измерения однородных ширин линий ($\Gamma_{\text{одн}}$), то есть ширин, вызванных динамическими возмущениями энергетических уровней, которые присущи в равной степени всем примесным центрам.

Необходимо отметить, что не все спектроскопические методики дают достоверную информацию об истинном значении $\Gamma_{\text{одн}}$. Существует вероятность того, что примесные центры будут иметь разные значения однородных ширин даже в одной и той же матрице (это может быть связано, например, с широким распределением интенсивности электрон-фононного взаимодействия по образцу). Всё это приводит к формированию сложного профиля линии на данной частоте и к некоторому распределению значений $\Gamma_{\text{одн}}$ в пределах неоднородно уширенной линии. Наиболее простой моделью, описывающей формирование однородной ширины линии оптического перехода, является модель взаимодействия электромагнитного излучения с системой двухуровневых примесных центров. В такой модели активные центры представляются в виде открытой системы – ансамбля двухуровневых частиц, которые взаимодействуют с электромагнитным полем и термостатом, а ширина спектральной линии, определяемая временем фазовой релаксации T_2 , может быть записана как:

$$\Gamma_{\text{одн}} = \frac{1}{\pi T_2} = \frac{1}{2\pi T_1} + \frac{1}{\pi T_2'}, \quad (1)$$

где T_1 – время жизни возбуждённого уровня или время продольной релаксации, а T_2' – время фазовой когерентности (время чистой дефазировки), определяемое разбросом частот оптического перехода. Времена релаксации (а, следовательно, и $\Gamma_{\text{одн}}$) сильно зависят от температуры, поэтому одной из эффективных методик изучения релаксационных процессов служит метод, связанный с измерением температурной зависимости однородной ширины ($\Gamma_{\text{одн}}(T)$). Измерение $\Gamma_{\text{одн}}(T)$ какого-либо электронного перехода хромофорной молекулы даёт возможность исследовать иерархию механизмов, определяющих оптическую дефазировку, которые последовательно активизируются с ростом температуры.

Большое количество исследований низкотемпературных свойств неупорядоченных сред показало, что эти свойства являются универсальными для всех подобных систем и характеризуются непосредственно самим фактом наличия беспорядка в их внутреннем строении. Было установлено, что при низких температурах динамика оптических спектров примесных центров в аморфных матрицах определяется не акустическими фононами, а некоторыми дополнительными низкоэнергетическими возбуждениями. В температурном диапазоне до нескольких градусов Кельвина – это туннелирующие двухуровневые системы (ДУС) [3], а при более высоких температурах – квазилокализованные низкочастотные колебательные моды (НЧМ) [4]. В настоящее время низкотемпературная динамика аморфных примесных сред достаточно хорошо исследована, причём взаимодействие активных центров с ДУС при очень низких температурах изучено намного подробнее, чем влияние НЧМ, проявляющееся в гораздо более широком диапазоне температур. Существуют также подходы, описывающие внутреннюю динамику неупорядоченных сред и при более высоких температурах, однако, наблюдаемая картина настолько усложняется, что её уже не удастся свести к элементарным возбуждениям типа ДУС и НЧМ. Проблема исследования свойств неупорядоченных веществ в области промежуточных и, особенно в области высоких (вплоть до комнатных) температур, остаётся важной задачей. Развитие методов высокотемпературной спектроскопии аморфных сред во многом определяет дальнейший прогресс как в области фундаментальных исследований, так и в области практических приложений, связанных, например, с изучением биологических объектов.

Методика измерения времён сверхбыстрой фазовой релаксации

Оптическая эхо-спектроскопия позволяет измерять $\Gamma_{\text{одн}}$ электронных переходов хромофоров, скрытые внутри широкого неоднородно-уширенного контура по кривым спада эхо-сигналов. Методика ФЭ эффективна лишь в том диапазоне температур, где в кривой спада удастся выделить вклад БФЛ электронного перехода, то есть измерить характеристическое время спада – время фазовой релаксации T_2 . С ростом температуры вклад БФЛ уменьшается и при некоторой температуре кривая становится симметричной. Однако информация о времени дефазировки содержится и в таких симметричных кривых спада. Здесь на помощь приходит тот факт, что при одновременном возбуждении резонансной среды лазерными импульсами, эта среда высвечивает сигналы так называемого четырёхволнового смешения (ЧВС) в разных направлениях. Варьируя задержку между возбуждающими импульсами и регистрируя одновременно сигналы ЧВС, можно по временной раздвижке между максимумами этих сигналов измерять времена фазовой релаксации T_2 .

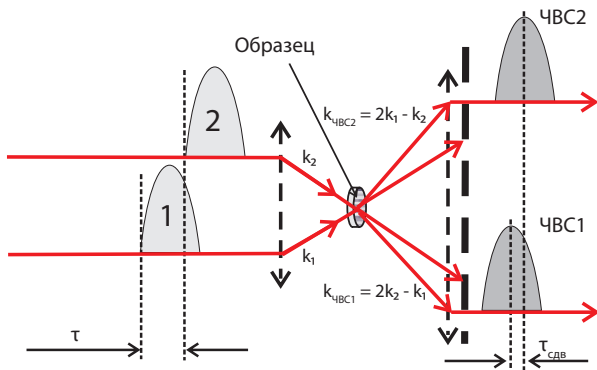


Рис. 1. Схема возбуждения сигналов ЧВС. Обозначения: $\tau = 0.006\text{--}0.6$ пс – временной интервал (задержка) между возбуждающими импульсами (1 и 2), $\tau_{\text{сдв}}$ – относительный временной сдвиг между максимумами сигналов прямого и обратного ЧВС (ЧВС1 и ЧВС2, соответственно), k_i – волновые векторы возбуждающих импульсов и сигналов ЧВС, $i = 1, 2$, ЧВС1, ЧВС2.

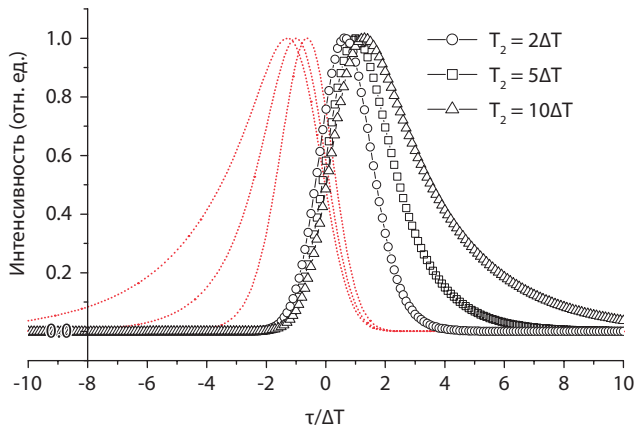


Рис. 2. Результат численного моделирования кривых спада сигналов “обратного” ЧВС для нескольких значений времени фазовой релаксации T_2 . По оси абсцисс отложена величина $t/\Delta T$, где ΔT – ширина АФ лазерного источника. Пунктирными линиями обозначены сигналы “прямого” ЧВС.

Методика измерения коротких времён фазовой релаксации была впервые предложена в работе А. Вейнера и Э. Иппена [5] (см. также [6]). Эта техника сводится к одновременной регистрации кривых спада двух эхосигналов – сигналов “левого” и “правого” (используются также термины “прямое” и “обратное”) ФЭ (как показано на рис. 1). Возбуждение резонансной среды двумя импульсами с волновыми векторами k_1 и k_2 , при очень малых (фемтосекундных) временных интервалах (раздвижках) между ними приводит к высвечиванию двух сигналов ЧВС в направлениях $2k_2 - k_1$ и $2k_1 - k_2$ (соответственно, сигналы левого и правого эха). При увеличении временного интервала τ между первым и вторым импульсами эхо-сигнал в направлении $2k_1 - k_2$ подавляется, и мы наблюдаем обычное первичное ФЭ (ПФЭ), подчиняющееся условию пространственного синхронизма $k_{\text{ПФЭ}} = 2k_2 - k_1$. Важным моментом здесь является возможность измерения временного сдвига между

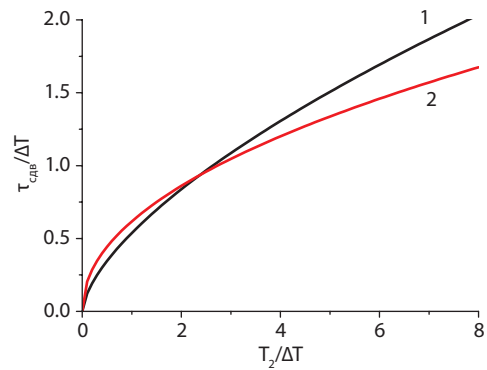


Рис. 3. Результат численного расчёта зависимости относительного временного сдвига между максимумами сигналов ЧВС ($\tau_{\text{сдв}}$) от времени фазовой релаксации T_2 , нормированных на ширину АФ лазерного источника (ΔT) для лоренцевой (1) и гауссовой (2) форм АФ.

максимумами сигналов ($\tau_{\text{сдв}}$). Точность таких измерений значительно повышается за счёт усреднения по огромному количеству “элементарных” сигналов ФЭ.

В работе [7] было показано, что вывод аналитического выражения для кривых спада сигналов ЧВС при одновременном возбуждении резонансной среды двумя лазерными импульсами представляет собой практически неразрешимую задачу. Поэтому во многих работах (см., например, [7, 8]) такие кривые моделировались численно с различными допущениями. Расчёт откликов (с учётом гауссовой формы автокорреляционной функции (АФ) возбуждающих импульсов и в условиях сильного неоднородного уширения) показывает, что временные зависимости интенсивности сигналов ЧВС имеют вид двух симметричных относительно нуля кривых [8]. На рис. 2 приведён результат моделирования кривых спада (нормированных на максимум) для нескольких значений T_2 в зависимости от величины задержки τ . Видно, что с ростом T_2 временной сдвиг $\tau_{\text{сдв}}$ увеличивается, что даёт возможность определить время фазовой релаксации. Результат расчёта зависимости времени фазовой релаксации от величины временного сдвига между максимумами сигналов ЧВС для разных форм АФ представлен на рис. 3.

Спектрометр некогерентного фотонного эха

Для увеличения временного разрешения методики использовали технику НФЭ, подробно описанную нами в работах [9, 10]. Поскольку временное разрешение метода ФЭ определяется не длительностью возбуждающих импульсов, а временем когерентности лазерного источника, то при использовании широкополосного (некогерентного) излучения можно значительно увеличить временное разрешение и исследовать процессы в субпикосекундном диапазоне длительностей без использования дорогостоящей и сложной фемтосекундной лазерной техники. Как показывают экспериментальные исследования, предельное временное разрешение созданной экспериментальной уста-

новки достигает величины в несколько фемтосекунд, при ширине автокорреляционной функции $\sim 100\text{--}300$ фс.

Уникальная экспериментальная установка, позволившая не только наблюдать, но и активно использовать НФЭ для фундаментальных научных исследований в области спектроскопии неупорядоченных сред, была создана в отделе молекулярной спектроскопии Института спектроскопии РАН (ИСАН, г. Троицк) [11]. Схема данной установки неоднократно обсуждалась ранее (см., например, [11, 12]). В её основе – лазер на красителе (спиртовой раствор родамин-6Ж) с поперечной накачкой второй гармоникой Nd^{3+} :YAG-лазера, построенный по безрезонаторной схеме. Лазер генерирует импульсы с регулируемой (до 30 нм) шириной, длительностью 15 нс и энергией в импульсе до 2 мДж. Оптическая схема установки состоит из нескольких линий временных задержек, предназначенных для формирования последовательности возбуждающих лазерных импульсов. Прецизионный механизм, снабжённый шаговым двигателем, позволяет регулировать задержку между импульсами в больших пределах с шагом кратным 5.6 фс. Детектирование сигналов ЧВС осуществляется чувствительной ПЗС-камерой PCO SensiCam EM с внутренним размножением электронов. Система регистрации представляет собой автоматизированный многоканальный измерительный комплекс, позволяющий управлять линиями временных задержек и стробированием фотоприёмника, одновременно регистрировать различные эхо-сигналы и сигнал шумового лазера. Помимо этого, система производит обработку экспериментальных результатов: нормировку, калибровку и интерпретацию массива экспериментальных данных. Синхронное компьютерное управление лазером, линиями задержки, системой регистрации и предварительной обработки измеряемых сигналов осуществляется с помощью специально разработанного (ИСАН) программного обеспечения.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Методом ЧВС с использованием некогерентного лазера нами были исследованы при высоких температурах процессы сверхбыстрой дефазировки в ряде полимеров с примесью различных красителей и измерены времена фазовой релаксации. Изучены следующие аморфные системы: полиметилметакрилат, допированный красителем родамин-101 (Рд-101/ПММА) и молекулами тетра-*терт*-бутил-террилена, поливинилбутираль с примесью органического красителя стирил-9М, а также полиизобутилен, допированный тетра-*терт*-бутил-терриленом (ТБТ/ПИБ) [12–15]. Измеренные времена фазовой релаксации при комнатной температуре для данных систем составили 15–35 фс. Для примера на рис. 4 приведены кривые спада сигналов ЧВС, измеренные в полимерном образце Рд-101/ПММА при комнатной температуре. В данном образце $T_2 = 22 \pm 3$ фс, что соответствует $\Gamma_{\text{одн}} \sim 14 \cdot 10^6$ МГц.

С использованием развитой методики НФЭ была измерена $\Gamma_{\text{одн}}(T)$ полосы $S_0\text{--}S_1$ перехода хромофорных

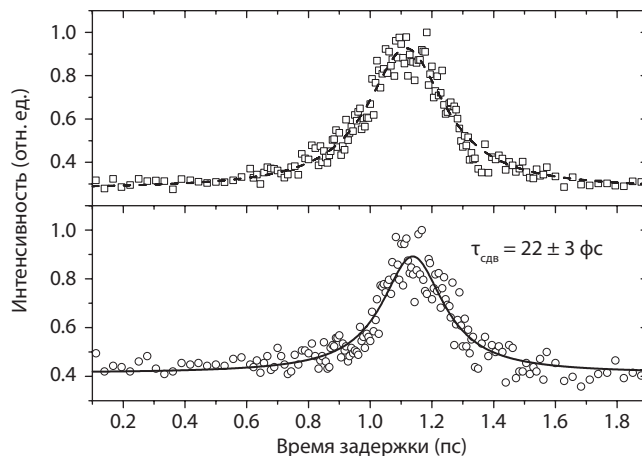


Рис. 4. Интенсивности сигналов прямого ($\square$) и обратного ($\circ$) ЧВС в зависимости от времени задержки между возбуждающими импульсами. Сплошная и штриховая линии – результат аппроксимации данных функциями Лоренца.

молекул ТБТ в матрице ПИБ в широком температурном диапазоне [14]. Для каждого значения температуры измеряли кривые спада сигналов ЧВС и по временному сдвигу между максимумами этих сигналов определяли время дефазировки T_2 и $\Gamma_{\text{одн}}$. На рис. 5б представлена зависимость $\Gamma_{\text{одн}}(T)$ при высоких (77.3–300 К) температурах. Было проведено сравнение полученных результатов с данными экспериментов по ФЭ в данной системе при температурах от 0.35 до 25 К (см. рис. 5а) [16]. $\Gamma_{\text{одн}}(T)$ в широком диапазоне температур (0.35–300 К) показана на рис. 6.

Зависимость ширины линии в системе ТБТ/ПИБ, измеренная методом ФЭ при низких температурах (квадраты и кружки на рис. 5а и б), описывается следующим уравнением:

$$\Gamma_{\text{одн}}^{\text{НТ}} = \frac{1}{\pi T_2(T)} = \Gamma_0 + bT^\alpha + w \frac{\exp(-\Delta E / kT)}{[1 - \exp(-\Delta E / kT)]^2}, \quad (2)$$

где $\Gamma_0 = 1/2\pi T_1 = 55.5$ МГц ($T_1 = 2.8$ нс) – естественная ширина линии; второе слагаемое описывает уширение линии, вызванное взаимодействием примесных центров с туннелирующими ДУС ($b = 33.8$ МГц/К $^\alpha$, $\alpha = 1.1 \pm 0.1$; третье – дефазировку, обусловленную взаимодействием с НЧМ с частотой $w = 24.5$ ГГц и энергией $\Delta E = 13.4 \pm 2.0$ см $^{-1}$ [16].

Данные высокотемпературных измерений (рис. 6) не могут быть объяснены лишь с учётом взаимодействия хромофорных молекул с ДУС и НЧМ простой формулой (2). Наблюдаемая при высоких температурах (от 77.3 до 300 К) зависимость $\Gamma_{\text{одн}}(T)$ была описана нами в рамках динамической теории оптической дефазировки в твёрдых средах, развитой И. С. Осадько, учитывающей взаимодействие примесного центра с акустическими фононами матрицы [17]. Отметим, что в рамках данного подхода авторам работы [18] удалось описать $\Gamma_{\text{одн}}(T)$ линии $^5\text{D}_0\text{--}^7\text{F}_0$ перехода редкоземельных ионов Eu^{3+} , внедрённых

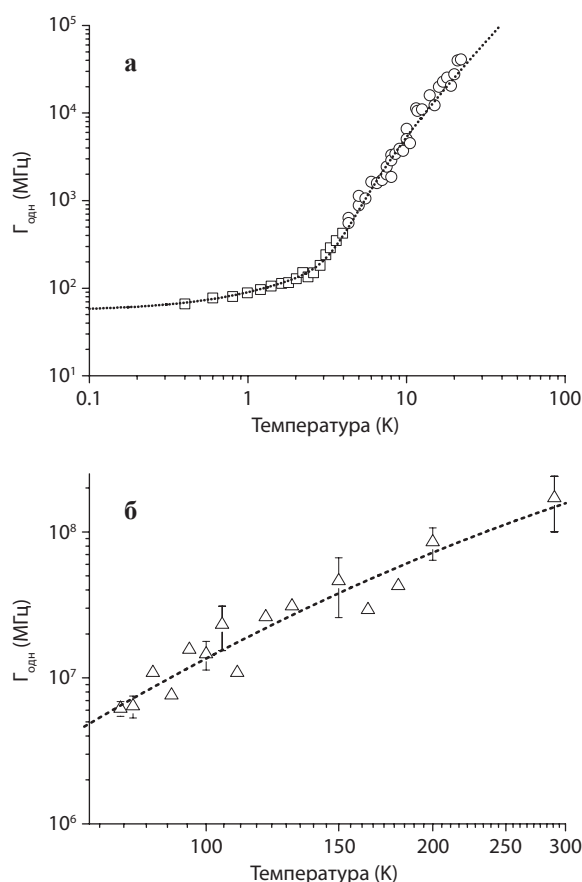


Рис. 5. Температурная зависимость $\Gamma_{\text{одн}}(T) = 1/\pi T_2(T)$ в системе ТБТ/ПИБ в области низких (0.35–25 К) [16] температур (а) и в области высоких (77.3–300 К) температур (б). Обозначения: $\square$ – данные по двухимпульсному ФЭ, $\circ$ [16] и Δ [14] – данные по НФЭ. Пунктирная линия – результат аппроксимации зависимости формулой (2), штриховая – формулой (3).

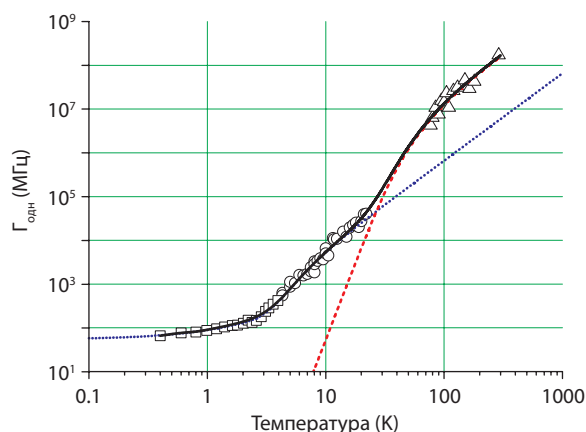


Рис. 6. Температурная зависимость однородной ширины спектральной полосы перехода S_0-S_1 молекул тетра-*терт*-бутил-террилена в матрице полиизобутилена в диапазоне температур от 0.35 до 300 К, измеренная методами двухимпульсного ФЭ ($\square$) и НФЭ ($\circ$ [16] и Δ [14]). Пунктирная линия – результат аппроксимации зависимости формулой (2), штриховая – формулой (3), сплошная линия – их суммой.

в матрицу неорганического стекла. Методику НФЭ применяли ранее для исследования оптической дефазировки в ряде органических матриц при комнатной температуре, однако комплексного исследования динамики оптических спектров и зависимостей $\Gamma_{\text{одн}}(T)$ в широком диапазоне высоких температур не проводили.

В работе [17] было показано, что для случая слабого температурного уширения и сдвига спектральной линии в дебаевском приближении для фононного спектра можно получить следующую упрощённую формулу:

$$\Gamma_{\text{одн}}^{\text{ВТ}}(T) = 18\pi v_{\text{д}} b^2 \left(\frac{T}{\theta} \right)^{\frac{7}{2}} \int_0^{\frac{\theta}{T}} \frac{x^6 \exp(x)}{[\exp(x) - 1]^2} dx, \quad (3)$$

где $b = W/v_{\text{д}}$ – безразмерный параметр, W – константа электрон-фононного взаимодействия, $v_{\text{д}}$ и $\theta = k_{\text{Б}} v_{\text{д}}$ – частота и температура Дебая (величины, ограничивающие спектр фононов).

Измеренная в нашем образце зависимость $\Gamma_{\text{одн}}(T)$ при высоких температурах была аппроксимирована уравнением (3) (штриховая линия на рис. 5б и 6). Параметры подгонки: $\theta = 260$ К, $W = 2.05 \cdot 10^{16}$ ед. Отметим, что похожее поведение однородных ширин линий хромофоров предсказывается и в рамках модели мягких потенциалов [19] (данная модель учитывает взаимодействие примесных центров с широким спектром низкоэнергетических колебательных мод в диапазоне промежуточных температур). Основное отличие заключается в плотности состояний колебательных возбуждений: в модели мягких потенциалов плотность состояний гармонических осцилляторов (колебательных возбуждений) $n(E) \sim E$, а для фононов в кристаллах $n(E) \sim E^2$. Параметр θ и в том и в другом случае определяет максимальную частоту (энергию) колебательных мод. Для акустических фононов это температура Дебая, которая обычно значительно выше температурной границы для квазилокализованных мод. Несмотря на то, что в рассмотренных нами литературных источниках не нашлось данных о температуре Дебая для полиизобутилена, полученное значение 260 К хорошо соответствует данным для другой полимерной матрицы – ПММА (265 К) и находится в хорошем согласии с величинами θ для многих полимеров. Зависимость однородной ширины полосы S_0-S_1 перехода хромофорных молекул ТБТ в матрице ПИБ при температурах от долей Кельвина до комнатной корректно описывается уравнением, включающим в себя низко- и высокотемпературную части: $\Gamma_{\text{одн}}(T) = \Gamma_{\text{одн}}^{\text{НТ}}(T) + \Gamma_{\text{одн}}^{\text{ВТ}}(T)$ (сплошная линия на рис. 6). Учёт вклада акустических фононов позволяет описать расхождение между результатами низкотемпературных экспериментов с расчётной кривой (2) для системы ТБТ/ПИБ при $T > 20$ К. Для наиболее полного описания температурной зависимости необходимо измерить $\Gamma_{\text{одн}}$ в промежуточном температурном диапазоне (25–77 К). Однако на основании имеющихся данных можно утверждать, что при высоких температурах основной вклад в однородное уширение спектральной полосы молекул тетра-*терт*-бутил-террилена

вносит их взаимодействие с колебательными возбуждениями матрицы – полиизобутилена, характеризующимися дебаевским спектром. Из анализа $G_{\text{одн}}(T)$ можно также определить характерную температуру перехода от механизма оптической дефазировки, обусловленного взаимодействием хромофорных молекул с квазилокализованными колебательными возбуждениями матрицы, к механизму, вызванному взаимодействием хромофоров с акустическими фононами, с дебаевским спектром. В исследованном образце эта температура $T_{\text{ц}} = 25$ К.

Заключение

Проведено комплексное научное исследование высокотемпературной динамики оптических спектров примесных центров – хромофорных молекул-зондов в полимерных матрицах. При помощи развитой методики оптической спектроскопии НФЭ исследованы в широком диапазоне температур процессы оптической дефазировки и измерены времена фазовой релаксации хромофорных молекул, внедрённых в полимерные матрицы. Установлен механизм однородного уширения спектров молекул тетра-*терт*-бутил-террилена в полиизобутилене в диапазоне температур 77–300 К и определена температура образца, при которой происходит качественное изменение механизма оптической дефазировки.

Исследования проведены совместно с отделом молекулярной спектроскопии Института спектроскопии РАН в рамках научной стажировки м.н.с. Каримуллина К. Р. по программе РФФИ “Мобильность молодых учёных” (грант № 09-02-90705-моб_ст). Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 08-02-00032а), Президиума РАН (Программа “Квантовая физика конденсированных сред”), ОФН РАН (Программа “Фундаментальная оптическая спектроскопия и её приложения” и “Фундаментальные основы акустической диагностики искусственных и природных сред”) и гранта Президента РФ “Ведущие научные школы” (НШ-2965.2008.2).

Литература

1. Копвиллем У.Х., Нагибаров В.Р.: Физика металлов и металловедение **15**, 313–315 (1963)
2. Kurnit N.A., Abella I.D., Hartmann S.R.: Phys. Rev. Lett. **13**, 567–570 (1964)
3. Phillips W.A.: J. Low Temp. Phys. **7**, 351–360 (1972)
4. Buchenau U., Prager M., Nücker N., Dianoux A.J., Ahmad N.A., Phillips W.A.: Phys. Rev. B **34**, 5665–5673 (1986)
5. Weiner A.W., Ippen E.P.: Opt. Lett. **9**, 53–55 (1984)
6. Weiner A.W., De Silvestri S., Ippen E.P.: JOSA **2**, 654–662 (1985)
7. Morita N., Yajima T.: Phys. Rev. A **30**, 2525–2536 (1984)
8. Kobayashi T., Terasaki A., Hattori T., Kurokawa. K.: Appl. Phys. B **47**, 107–125 (1988)
9. Зуйков В.А., Каримуллин К.Р., Митрофанова Т.Г., Самарцев В.В., Шегеда А.М., Шкаликов А.В.: Изв. РАН. Сер. физ. **72**, 67–72 (2008)
10. Зуйков В.А., Каримуллин К.Р., Митрофанова Т.Г., Самарцев В.В., Шегеда А.М., Шкаликов А.В.: Казанский физико-технический институт имени Е. К. Завойского 2007. Ежегодник, с. 116. Казань: ФизтехПресс 2008.
11. Вайнер Ю.Г., Груздев Н.В.: Оптика и спектроскопия **76**, 252–258 (1994)
12. Каримуллин К.Р., Вайнер Ю.Г., Ерёмчев И.Ю., Наумов А.В., Самарцев В.В.: Учён. зап. КГУ. Сер. “Физ.-мат. науки” **150**, 148–159 (2008)
13. Каримуллин К.Р.: Сб. тр. “Структура и динамика молекулярных систем”, вып. XVI, ч. 3, с. 240–243. Йошкар-Ола-Уфа-Казань-Москва 2009.
14. Каримуллин К.Р.: Материалы Четвёртой междунар. научн. школы “Наука и инновации-2009” (Попов И.И., Козлов В.А., Самарцев В.В., Зинов В.А., Яшин В.Г., ред.), вып. IV, с. 72–78. Йошкар-Ола: МарГУ 2009.
15. Karimullin K.R., Vainer Yu.G., Naumov A.V., Yeremchev I.Yu.: Abstr. of reports of XVI Symp. on High Resolution Molecular Spectroscopy “HighRus-2009”, p. 173. Tomsk: V. E. Zuev Institute of atmospheric optics SB RAS 2009.
16. Vainer Yu.G., Kol'chenko M.A., Naumov A.V., Personov R.I., Zilker S.J.: J. Luminescence **86**, 265–272 (2000)
17. Осадько И.С.: УФН **128**, 31–67 (1979)
18. Gladenkova S.N., Osad'ko I.S.: Chem. Phys. Lett. **187**, 628–632 (1991)
19. Garcia A.J., Fernandez J.: Phys. Rev. B **56**, 579–592 (1997)

Экспериментальная установка для исследования акустооптических явлений в магнитных материалах

С. А. Мигачёв, М. Ф. Садыков, Д. А. Иванов, М. М. Шакирзянов

Лаборатория магнитоакустики

Разработана многофункциональная автоматизированная экспериментальная установка для исследования магнитооптических, магнитоакустических и акустооптических свойств магнитоупорядоченных веществ. Установка позволяет исследовать физические явления при одновременном воздействии на вещество оптического излучения ближнего ИК-диапазона, акустических полей до 10^5 Вт/м² в магнитном поле до $1.67 \cdot 10^6$ А/м.

Открытые микропроцессорные системы сбора и обработки данных как наиболее универсальные, позволяющие гибко реагировать на появление новых современных устройств, находят всё большее применение в автоматизации экспериментальных научно-исследовательских установок. Универсальная система, способная к быстрой перестройке и адаптации к конкретному эксперименту, должна удовлетворять следующим взаимосвязанным условиям:

- в основе управления должна лежать программа, которая способна: взаимодействовать с аппаратной частью, позволять работать инженеру с базовыми знаниями программирования, быть интуитивно понятной для неспециалиста в программировании, позволять легко модифицировать части программы, т.е. быть наглядной и логически прозрачной, должна предусматривать возможность взаимодействия не только со специальным, но и различным внешним оборудованием по стандартным каналам связи (USB, GPIB, RS-232 и т.д.);
- аппаратная часть установки должна легко интегрироваться в современные информационные системы, иметь широкий спектр диапазонов и каналов измерения, иметь определённый набор управляющих и измерительных устройств.

Одним из наиболее удачных решений в направлении разработки универсальных систем автоматизации является подход компании “National Instruments” (NI) – технология виртуальных приборов на основе среды графического программирования LabVIEW.

Нами была создана многофункциональная автоматизированная экспериментальная установка по изучению магнитоупругих (МУ) и магнитооптических (МО) свойств антиферромагнетиков с использованием аппаратно-программных средств NI. Комплекс (рис. 1) позволяет решать три основные задачи: исследование магнитооптических, магнитоакустических свойств, изучение явления дифракции света на звуке в магнитных полях до $1.67 \cdot 10^6$ А/м.

Для исследования МО-свойств используется оптическая часть установки, состоящая из инфракрасного лазера с

источником питания, оптической системы формирования луча (КЛ), фотоприёмника (ФП) и электромагнита (МГ) с блоком питания (БПМ).

В нашей установке используется чувствительный ФП, схема которого показана на рис. 2. Излучение лазера после образца, поляризаторов и диафрагмы собирается объективом ФП на фоточувствительном элементе. Фотосопротивление R1, представляющее собой активную зону 1×1 мм² на подложке, конструктивно дополнено системой охлаждения с использованием эффекта Пельтье. Через ёмкость C1 принятый сигнал передаётся на первый каскад усилителя DA1 с коэффициентом усиления 100, затем сигнал усиливается вторым каскадом с переменным

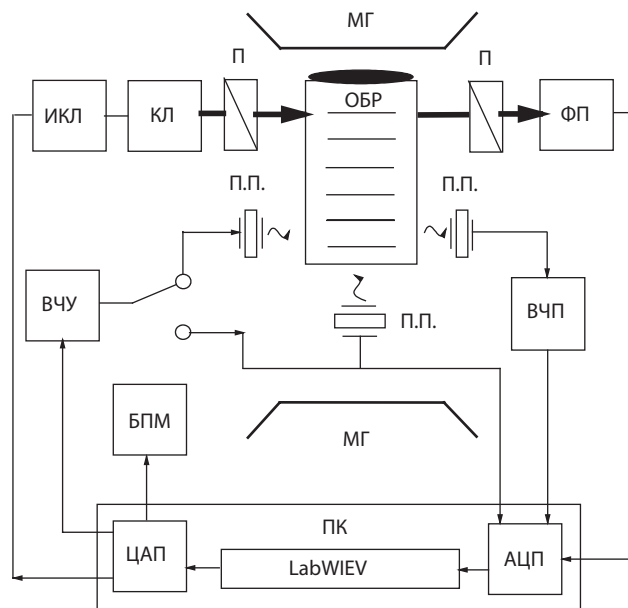


Рис. 1. Блок-схема установки для изучения МУ- и МО-свойств лёгкоплоскостных антиферромагнетиков: ИКЛ – инфракрасный лазер ($\lambda = 1.35$ мкм); П – поляризаторы; ОБР – образец; П.П. – пьезопреобразователь (LiNbO₃, X – срез); ВЧУ – генератор несущей частоты (20–520 МГц), усилитель мощности; ВЧП – высокочастотный супергетеродинный двухканальный приёмник (48–108 МГц); ПК – персональный компьютер.

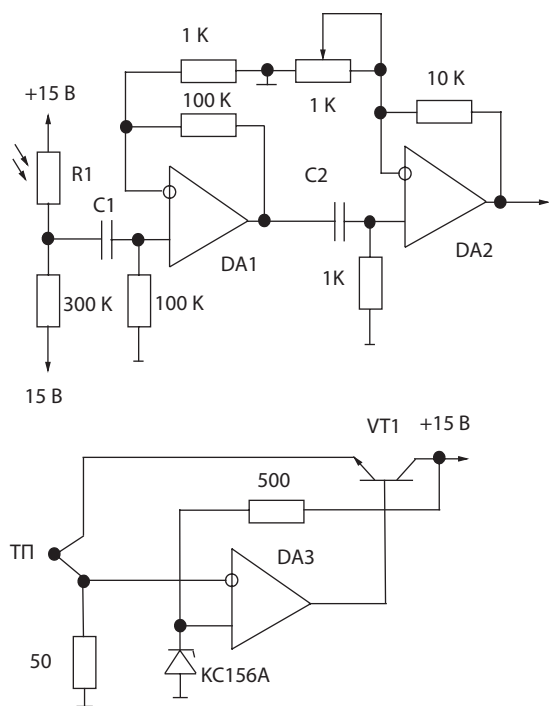


Рис. 2. Принципиальная схема фотоприёмника (усилители DA1–DA3 – K140УД17А, VT1 – KT817А).

коэффициентом усиления ($10 \div 1000$). Источником питания охладителя является стабилизированный генератор тока на операционном усилителе DA3, обеспечивающий необходимый для термопары (ТП) ток 150 мА.

Излучение полупроводниковых (ПП) лазеров обладает довольно большой расходимостью, что осложняет получение параллельных пучков с малой апертурой. Формирование пучка производится при помощи коллиматора и диафрагмы. Излучение модулируется с определёнными условиями эксперимента частотой и скважностью, поляризуется и направляется в исследуемый образец, на выходе регистрируется изменение интенсивности и поворот плоскости поляризации света.

Для исследования МУ-свойств гематита [1, 2] используется акустическая часть установки, состоящая из генератора несущей частоты с внешним модулятором, тактирующего генератора, усилителя мощности, передающего и приёмного пьезопреобразователей, супергетеродинного приёмника. Электрическая схема когерентного модулятора приведена на рис. 3. Высокочастотный (ВЧ) сигнал с генератора несущей частоты поступает на схему формирования синфазного тактирующего импульса, состоящую из модернизированного частотомера ЧЗ-57, вырабатывающего управляющий импульс с регулируемым числом периодов (от 10 до 100 периодов ВЧ). Формирователь управляющих импульсов вырабатывает два разнополярных импульса для управления модулятором. Таким образом, модулятор выдаёт когерентный ВЧ-импульс необходимой длительности диапазона 50–100 МГц.

Установка также позволяет проводить эксперименты по изучению характеристик акустооптического взаимо-

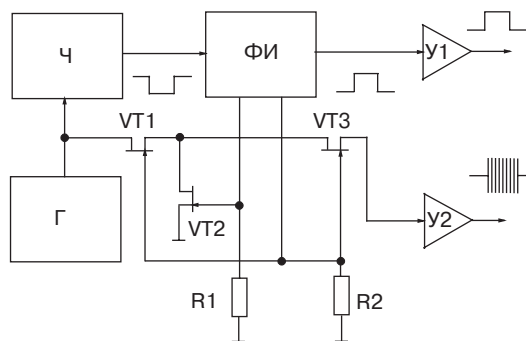


Рис. 3. Схема когерентного модулятора ВЧ-сигнала: Ч – частотомер; Г – генератор ВЧ; У1 – усилитель синхроимпульса; У2 – выходной усилитель ВЧ; ФИ – формирователь управляющих импульсов; VT1–VT3 – КП303А.

действия в магнитных кристаллах в постоянном внешнем магнитном поле [3, 4]. Для этого в комплекс включена система мощной акустической накачки (до 30 Вт), основанная на современных недорогих высокочастотных усилителях, например, таких как RA30H1317M (30–170 МГц) или RA45H4052M (400–520 МГц). Это законченные микросхемы, выполненные по гибридной технологии и основанные на современных MOSFET-транзисторах, которые легче справляются с ухудшением коэффициента стоячей волны (КСВ). Кроме того, эти усилители снабжены входом регулирования коэффициента усиления, что позволяет изменять уровень мощности.

К выходу модулятора подключается один из широкополосных усилителей мощности необходимого диапазона. Режим бегущей акустической волны создаётся поглощением ультразвука на противоположном пьезопреобразователю торце образца присоединенным коническим поглотителем, выполненным из меди, акустическое волновое сопротивление которой наиболее близко к волновому сопротивлению гематита.

Для оценки акустической мощности, прошедшей через образец, поглотитель снабжён ПП-измерителем температуры LM60. Это недорогое устройство имеет малые габариты, хорошую точность, подходящий температурный диапазон ($-40 \dots +125$), а также линеаризованную характеристику. Линейность характеристики и простота подключения позволяют интегрировать датчик в автоматизированную систему сбора данных. Для более точного измерения температуры, при которой ведутся эксперименты, предусмотрено также использование термостолбика термопар медь-константан.

Одной из оригинальных частей автоматизированной установки является разработанный нами блок питания электромагнита (рис. 4). Мы использовали линейный регулируемый стабилизатор. Регулирующий элемент состоит из восьми мощных полевых транзисторов, включённых параллельно. Выбранные транзисторы хорошо подходят по напряжению и току. Однако, поскольку они являются переключательными и имеют большую величину крутизны в истоковых цепях, то необходимо применить

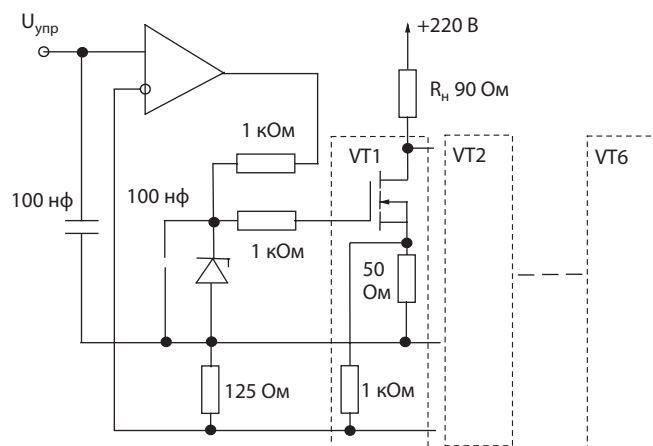


Рис. 4. Принципиальная электрическая схема блока питания электромагнита.

выравнивающие сопротивления. Для этого были использованы проволочные сопротивления большой мощности и хорошей термостабильности. Источковые сопротивления являются датчиками тока. Величины токов через транзисторы складываются и сравниваются с опорным операционным усилителем, который, в свою очередь, вырабатывает сигнал ошибки для её компенсации.

Для контроля за величиной магнитного поля мы использовали линейаризованный датчик Холла SS94A2D. Этот датчик также интегрирован в автоматизированную систему. Управляющим элементом разработанной автоматизированной установки является персональный компьютер. Ввод и вывод сигналов осуществляется посредством аппаратно-программного комплекса компании NI.

Основой ввода и вывода данных является плата PCI-6221, которая содержит 16-битный АЦП (аналого-цифровой преобразователь) с 16-канальным аналоговым коммутатором на входе, частоту дискретизации АЦП можно

регулировать вплоть до 250 кГц, кроме того, имеется два 16-битных ЦАП (цифро-аналоговый преобразователь) и три восьмибитных порта ввода-вывода. Используемая нами плата может работать как самостоятельное устройство в составе аппаратно-программного комплекса. Однако для расширения возможностей ввода-вывода информации данная плата была использована в составе аппаратного комплекса SCXI-1000 с дополнительными блоками SCXI-1124 и SCXI-1125. SCXI-1124 – шестиканальный гальванически развязанный 12-разрядный ЦАП, в дополнении к ЦАП, расположенным на плате PCI-6221, а SCXI-1125 – восьмиканальный гальванически развязанный предварительный усилитель с переменным коэффициентом усиления от 0.01 до 2000 для АЦП-платы PCI-6221. Таким образом, мы имеем 8 гальванически развязанных каналов АЦП и 6 гальванически развязанных каналов ЦАП, что очень удобно для экспериментальных установок. В качестве управляющей программы использовался язык графического программирования LabVIEW 8.2. В эту систему интегрировано множество различных функций, облегчающих работу с аппаратурой.

Используемый нами язык графического программирования имеет широкие возможности для создания интерфейсов пользователя. Лицевая панель разработанной установки изображена на рис. 5, где показана зависимость сигнала дифракции в лёгкоплоскостном антиферромагнетике $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ от магнитного поля при различных направлениях в базисной плоскости кристалла. Программа позволяет изменять скорость сканирования, устанавливать любой диапазон полей и количество точек сканирования, время измерения. В нижней части панели отображается зависимость сигналов дифракции и амплитуды ультразвука от времени, что позволяет автоматически и в ручном режиме сохранять полученные данные и зависимости (рис. 5). Использование языка графического программирования позволяет быстро модифицировать программу. На рис. 6

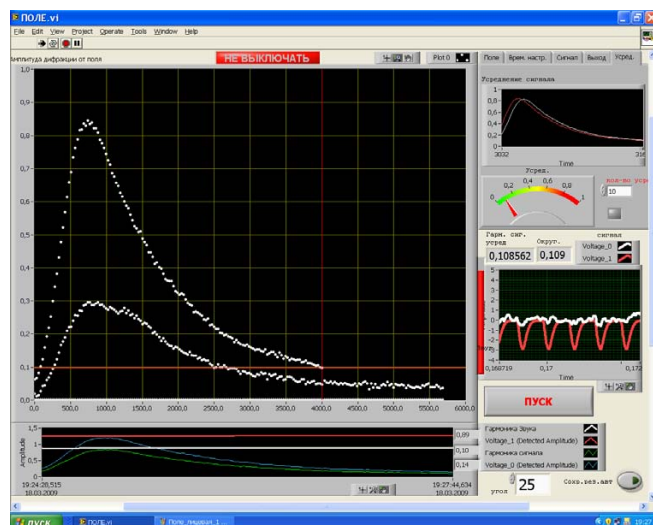


Рис. 5. Зависимость сигнала дифракции в лёгкоплоскостном антиферромагнетике от магнитного поля при различных ориентационных углах.

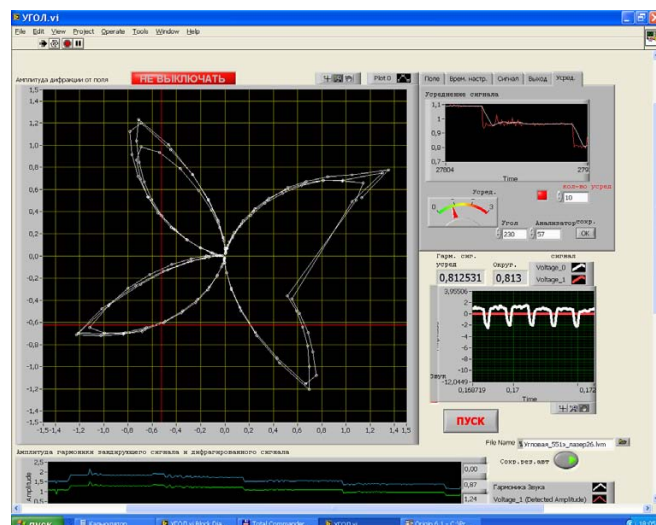


Рис. 6. Угловые зависимости сигнала дифракции в фиксированном поле.

показана лицевая панель, полученная из предыдущей программы. В этой программе снимаются данные другого эксперимента – угловые зависимости сигнала дифракции при фиксированном значении магнитного поля.

Выводы

Разработана многофункциональная экспериментальная установка для исследования оптических и акустических свойств магнетиков. Она позволяет исследовать физические процессы при одновременном воздействии оптического излучения ближнего ИК-диапазона, акустических полей до 10^5 Вт/м² в магнитном поле до $1.67 \cdot 10^6$ А/м. На данной установке для лёгкоплоскостного антиферромагнетика α -Fe₂O₃ (гематит) получены следующие результаты:

- впервые обнаружена зависимость оптического двулучепреломления от магнитного поля, оценены магнитооптические константы [1];
- впервые обнаружен и исследован акустический аналог эффекта Коттона-Мутона, заключающийся в появлении двулучепреломления магнитоупругих волн, распространяющихся вдоль оси симметрии третьего порядка [2];
- впервые экспериментально обнаружена дифракция света на звуке в режиме Рамана-Ната, обусловленная линейной модуляцией поляризаций нормальных оптических мод, связанной с осцилляциями вектора антиферромагнетизма L , вызванными МУ-взаимодействием

[3, 4] и исследована зависимость параметров дифракции от величины постоянного магнитного поля $H_{\perp}$, приложенного в базисной плоскости. Установлено, что величина дифракции в полях выше поля монокдоменизации гематита ($H_D \sim 1.8$ кЭ), полностью соответствует полевой зависимости коэффициента обменного усиления магнитоупругой связи. Максимум интенсивности дифрагированной волны, достигаемый в полях $H_{\perp} \approx H_D$, при мощности звукового потока в образце около 1 Вт/см², составил приблизительно 0.9% от интенсивности света на входе, а её поляризация перпендикулярна поляризации входной линейно-поляризованной волны. Полученные результаты согласуются с выводами теории акустооптической дифракции в антиферромагнетиках и подтверждают антиферромагнитный характер механизма дифракции в изучаемой геометрии эксперимента.

Литература

1. Akhmadullin I.Sh., Golenishchev-Kutuzov V.A., Migachev S.A., Sadykov M.F.: The physics of metals and metallography **93**, suppl. 1, S111–S113 (2002)
2. Ахмадуллин И.Ш., Мигачёв С.А., Садыков М.Ф., Шакирзянов М.М.: ФТТ **46**, 305–307 (2004)
3. Мигачёв С.А., Садыков М.Ф., Шакирзянов М.М.: Письма в ЖЭТФ **88**, 54–58 (2008)
4. Мигачёв С.А., Садыков М.Ф., Шакирзянов М.М.: ФТТ **50**, 1853–1857 (2008)

О роли спин-спиновых взаимодействий в экспериментах по акустическому ЯМР

М. М. Шакирзянов

Лаборатория магнитоакустики

На примере спин-системы ядер ($I = 3/2$) в кристаллах NaCl, имеющей в постоянном магнитном поле эквидистантный энергетический спектр, показано, что секулярная относительно зеемановского спектра часть спин-спиновых взаимодействий обуславливает затухание неравновесных средних значений всех диагональных операторов, за исключением оператора зеемановской энергии. На основании решения кинетических уравнений для спиновых средних, построенных с учётом этого факта, даётся объяснение результатов известных экспериментов по акустическому насыщению квадрупольных переходов с $|\Delta m| = 2$ без предположения о больцмановском распределении заселённости энергетических уровней в процессе возбуждения на временах больших времени спин-спиновой релаксации T_2 .

Одним из наиболее убедительных экспериментов, подтверждающих роль спин-спиновых взаимодействий в установлении спиновой температуры (больцмановского распределения), являются эксперименты по акустическому ядерному резонансу [1]. В этих экспериментах проводилось сильное насыщение ультразвуком квадрупольных переходов ($|\Delta m| = 2$) на двойной ларморовской частоте $\omega_0 = \gamma H_0$ зеемановского спектра ядер Na^{23} и Cl^{35} в постоянном магнитном поле H_0 (спины равны $3/2$) в монокристалле NaCl кубической симметрии. При достаточно больших интенсивностях ультразвука легко можно добиться выравнивания заселённости соответствующих уровней на временах значительно короче времён спин-решёточной релаксации, которые в данном веществе при комнатных температурах имеют порядка нескольких секунд ($T_1 \sim 14$ с) [2, 3]. Если при этом считать, что в системе нет спин-спиновых взаимодействий, вызывающих переходы с взаимным переворачиванием спинов, то в результате насыщения должна сохраниться продольная компонента намагниченности, равная по величине $1/5$ от равновесной намагниченности M_0 . Согласно эксперименту, намагниченность оказалась близкой к нулю [1] (подробно см., например, в [2]).

Теоретическое объяснение этого факта дано в той же работе [1] и основывается на гипотезе спиновой температуры. Согласно этой гипотезе [2, 3], неравновесная спин-система, благодаря спин-спиновым взаимодействиям, переходит на временах, которые существенно короче времён спин-решёточной релаксации, в состояние внутреннего равновесия, в котором распределение спинов по уровням энергетического спектра является больцмановским и определяется выражением $\exp(-E_i/kT_s)$ (E_i – энергия i -го уровня, T_s – спиновая температура, k – постоянная Больцмана). В этом случае для заселённости уровней спин-системы ядер в постоянном магнитном поле верно соотношение:

$$N_{3/2} - N_{-3/2} = 3(N_{1/2} - N_{-1/2}), \quad (1)$$

где N_i – заселённость уровня с $m_z = i$. Продольная компонента вектора намагниченности пропорциональна среднему значению (Z) оператора $\hat{I}_z$. Уравнение для Z легко составляется из уравнений баланса для заселённости зеемановских уровней и имеет вид [1, 2]:

$$\begin{aligned} dZ/dt = & -2W\{(N_{3/2} - N_{-3/2}) + (N_{1/2} - N_{-1/2})\} \\ & - (Z - Z^0)/T_1, \end{aligned} \quad (2)$$

где W – скорость индуцированного перехода, T_1 – время спин-решёточной релаксации, Z^0 – равновесное среднее. Выражение в фигурных скобках в правой части уравнения (2) с помощью соотношения (1) определяются через $Z = 3/2 \times (N_{3/2} - N_{-3/2}) + 1/2 \times (N_{1/2} - N_{-1/2})$. Тогда уравнение (2) запишется в виде:

$$dZ/dt = -2/5 \times W \times Z - (Z - Z^0) \times 1/T_1. \quad (3)$$

Отсюда, при $dZ/dt = 0$, имеем установившееся значение Z , равное

$$Z/Z^0 = 1/(1 + 2/5 \times W \times T_1), \quad (4)$$

а в случае сильного насыщения ($2/5 \times W \times T_1 \gg 1$) $Z \sim 0$, что согласуется с экспериментом. Это объяснение в дальнейшем неоднократно приводилось во многих обзорных статьях и книгах, посвящённых проблемам спиновой температуры в ЯМР (см., например, в [3–5]).

В то же время, как будет показано ниже, нет никакой необходимости в использовании соотношения (1), то есть гипотезы спиновой температуры, при выводе уравнения (3) из уравнений баланса. Однако заметим, что нет никаких оснований сомневаться в справедливости гипотезы о спиновой температуре. Причём предлагаемое рассмотрение даёт более последовательный учёт спин-спиновых взаимодействий как механизма установления внутреннего равновесия в спиновой системе. Действительно, выражение в фигурных скобках правой части уравнения (2) есть

комбинация средних значений диагональных операторов $\hat{I}_z$ и $\hat{\Phi} = (\hat{P}_{3/2,3/2} - \hat{P}_{-3/2,-3/2}) - 3(\hat{P}_{1/2,1/2} - \hat{P}_{-1/2,-1/2})$, а именно:

$$dZ/dt = -2/5 \times W \times (4Z - U) - (Z - Z^0) \times 1/T_1, \quad (5)$$

$$U = \langle \hat{\Phi} \rangle = (N_{3/2} - N_{-3/2}) - 3(N_{1/2} - N_{-1/2}),$$

$$\text{Sp}(\hat{I}_z \times \hat{\Phi}) = 0,$$

где $\hat{P}_{i/2,i/2}$ – проективные операторы [3], средние значения которых есть заселённости соответствующих уровней $N_{i/2}$. Поскольку при возбуждении квадрупольных переходов с $|\Delta m| = 2$ величина $U \neq 0$, то уравнение (5) необходимо дополнить уравнением для U [5]. При выводе этого уравнения необходимо учесть тот факт, что оператор $\hat{\Phi}$ не коммутирует с оператором секулярной части ($\mathcal{H}_d$)

$$\mathcal{H}_d = \sum_{\alpha < \beta} \{A_{\alpha\beta} \hat{I}_\alpha^z \hat{I}_\beta^z - 1/4 B_{\alpha\beta} (\hat{I}_\alpha^+ \hat{I}_\beta^- + \hat{I}_\alpha^- \hat{I}_\beta^+)\}$$

спин-спиновых взаимодействий, которая обуславливает переходы без изменения зеемановской энергии спинов. Прямой расчёт показывает, что оператор $\hat{\Phi}$ не коммутирует с членами типа $\hat{P}_{3/2,1/2}^\alpha \times \hat{P}_{-1/2,1/2}^\beta$, $\hat{P}_{1/2,-1/2}^\alpha \times \hat{P}_{-3/2,-1/2}^\beta$ ($\alpha \neq \beta$). Именно эти члены оператора спин-спиновых взаимодействий $\mathcal{H}_d$ определяют переходы с взаимным опрокидыванием спинов (флип-флоп процессы), что обуславливает изменение заселённостей уровней энергии и приводит к установлению внутреннего равновесия в спин-системе ядер на временах T_2 . Итак, можно утверждать, что изменение среднего значения диагонального оператора $\hat{\Phi}$ обусловлено спин-спиновыми взаимодействиями (разумеется также и внешним воздействием), поскольку скорость спин-спиновой релаксации T_2 существенно превосходит скорость спин-решёточной релаксации (например, в кристаллах NaCl примерно на пять порядков [5]). О скорости спин-спиновых процессов можно судить, например, по данным о времени необратимого затухания сигнала свободной индукции [5]. Таким образом, уравнение для U запишется в виде [2, 5]:

$$dU/dt = 2/5 \times W \{4Z - U\} - U/T_2^*, \quad T_2^* \sim T_2. \quad (6)$$

Равновесное среднее значение оператора U равно нулю ($U^0 = 0$) в силу первоначального больцмановского распределения спинов при температуре термостата [2].

На временах $t > T_2^*$ можно считать $dU/dt = 0$. Тогда, выразив U через Z с помощью уравнения (6) и подставив это значение U в уравнение (5), получим:

$$dZ/dt = -8/5 \times W (1 + 2/5 \times W \times T_2^*)^{-1} \times Z - (Z - Z^0) \times 1/T_1. \quad (7)$$

Уравнение (7) аналогично уравнению (3) для Z , поскольку по условиям эксперимента [1] $W \ll 1/T_2$ и малая величина $2/5 \times W \times T_2^* \ll 1$ не оказывает влияния на конечный результат (им можно пренебречь по сравнению с единицей). Отсюда естественным образом вытекает и объяснение результатов эксперимента по акустическому

насыщению переходов с $|\Delta m| = 2$ в ядерной спин-системе с эквидистантным, зеемановским спектром [1].

Вышеизложенные рассуждения являются, на наш взгляд, более правильными и логичными при изучении роли спин-спиновых взаимодействий и выводе уравнения (3) (или (7)), описывающего экспериментальные результаты работы [1]. Заметим также, что спин-спиновый характер релаксации среднего значения U диагонального оператора $\hat{\Phi}$ (не равного нулю на временах $t \leq T_2$) приводит к исчезновению U на временах порядка времени T_2 , что, очевидно, и подтверждает роль спин-спиновых взаимодействий в установлении больцмановского распределения, при котором $U = 0$. В то же время, в отсутствие спин-спиновых взаимодействий $1/T_2^* = 0$ и, как следует из уравнений (5) и (6), величина $F(t) = Z(t) + U(t)$ на временах $t < T_1$ остаётся постоянной величиной и определяется начальным значением $Z(t_0) \equiv Z^0$ при температуре решётки T_0 в поле H_0 , поскольку в силу соотношения $\text{Sp}(\hat{I}_z \times \hat{\Phi}) = 0$ и равновесной матрицы плотности $\rho(t_0) \approx 1 - h\omega_0 \hat{I}_z / kT_0$, в начальный момент времени $U(t_0) = 0$. В этом случае величина $F(t) = Z(t) + U(t) = Z^0$ и уравнение (5) для $Z(t) \equiv Z$ на временах $t < T_1$ может быть записана в виде:

$$dZ/dt = -2/5 \times W \times (5Z - F(t))$$

или

$$dZ/dt + 2WZ = 2/5 \times W \times Z^0. \quad (8)$$

Решение уравнения (8) при $W = \text{const}$ на временах $t < T_1$ имеет вид: $Z(t) = 1/5 \times Z^0$.

Однако в реальности спин-спиновые взаимодействия в ядерных спин-системах всегда существуют и флип-флоп процессы всегда приводят к установлению больцмановского распределения на уровнях энергии зеемановского спектра на временах T_2 . В то же время в магнитном резонансе всегда существует возможность подавления флип-флоп процессов за счёт увеличения интенсивности внешнего переменного поля, т.е. за счёт увеличения скорости индуцированных переходов [6]. Как было показано в работе [7] теоретически и в работе [8] экспериментально, квантование спинов в акустических полях большой интенсивности (энергия взаимодействия спиновой системы с внешним акустическим полем резонансной частоты ($\mathcal{H}(t)$) значительно больше энергии спин-спиновых взаимодействий $\mathcal{H}_d$ ($\langle \mathcal{H}(t) \rangle \gg \langle \mathcal{H}_d \rangle$)), сопровождается захватом квадрупольного момента ядра ($I \geq 1$) градиентом электрического поля, создаваемым на месте расположения ядра акустическими деформациями. При этом захваченный квадрупольный момент спин-системы удерживается на временах $t \sim T_1 \gg T_2$ и данное состояние спин-системы, характеризующееся энергией взаимодействия с акустическим полем $\langle \mathcal{H}(t) \rangle$, может быть разрушено лишь благодаря взаимодействию с термостатом (решёткой). Это связано с тем, что при $\langle \mathcal{H}(t) \rangle \gg \langle \mathcal{H}_d \rangle$ происходит дополнительное усечение гамильтониана спин-спиновых взаимодействий $\mathcal{H}_d$ в

представлении взаимодействия, что соответствует подавлению флип-флоп процессов в зеемановском спектре. В этом случае, измеряемая намагниченность оказалось равной в начальный момент времени $Z(t) \approx 1/5 \times Z^0$ и в дальнейшем медленно спадала до нулевых значений на временах T_1 (в кристаллах NaCl время ядерной спин-решёточной релаксации порядка 14 с) [8].

В заключение ещё раз необходимо отметить следующее. Нет никаких сомнений в правомерности и полезности гипотезы спиновой температуры, благодаря которой была создана всеобъемлющая теория ЯМР и ЭПР в твёрдых телах, позволившая физически правильно описать и объяснить огромное число экспериментальных результатов. В данной работе показаны лишь возможность объяснения на основе правильно составленных уравнений баланса экспериментальных результатов по акустическому насыщению (уравнений Вагнессеса-Блоха) в ядерных спиновых системах ($I \geq 3/2$) на двойной ларморовой частоте без

введения понятия спиновой температуры и то, что эти эксперименты не могут служить подтверждением этой гипотезы.

Литература

1. Abragam A., Proctor W.G.: Phys. Rev. **109**, 1441–1458 (1958)
2. Абрагам А.: Ядерный магнетизм. М.: Иностран. лит-ра 1963. 551 с.
3. Гольдман М.: Спиновая температура и ЯМР в твёрдых телах. М.: Мир 1972. 342 с.
4. Болеф Д.В.: Физическая акустика, т. 4А, с. 139–217. М.: Мир 1970.
5. Кессель А.Р.: Ядерный акустический резонанс. М.: Наука 1969. 215 с.
6. Redfield A.G.: Phys. Rev. **98**, 1787–1809 (1955)
7. Кессель А.Р., Шакирзянов М.М.: ЖЭТФ **83**, 1100–1103 (1982)
8. Кирсанов В.А., Тарасов В.Ф., Шакирзянов М.М.: ФТТ **27**, 1554–1556 (1985)

Решёточные, электрические и магнитные эффекты в манганитах лантана $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($x = 0.125, 0.15, 0.175$)

Х. Г. Богданова, А. Р. Булатов

Лаборатория магнитоакустики

В лантан-стронциевых манганитах составов $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($x = 0.125, 0.15, 0.175$) измерены температурные зависимости скоростей поперечного и продольного гиперзвука на частотах 0.5–0.77 ГГц. Обнаружены структурные фазовые переходы, положение которых подтверждено данными по электросопротивлению и магнитным измерениям, выполненным на тех же образцах. Полученные результаты анализируются в рамках обсуждаемой в литературе [1, 2, 5] модели конкурирующих ян-теллеровских искажений и магнитного упорядочения. Аномалии в поведении скоростей продольного гиперзвука связываются с локальными ян-теллеровскими искажениями, подавление которых при магнитном упорядочении рассматривается как возможная причина колоссального магнитосопротивления (КМС).

Образцы и методика исследований

Исследуемые монокристаллические образцы манганитов лантана составов $\text{La}_{0.875}\text{Sr}_{0.125}\text{MnO}_3$, $\text{La}_{0.85}\text{Sr}_{0.15}\text{MnO}_3$ и $\text{La}_{0.825}\text{Sr}_{0.175}\text{MnO}_3$ были выращены в группе А. М. Балбашова (МЭИ). Образец с $x = 0.125$ имел цилиндрическую форму с диаметром 5 мм и длиной 3.2 мм, торцы которого были плоскопараллельными с точностью до нескольких секунд. Грани образца были перпендикулярны осям [100], [010] и [001]. Образцы с $x = 0.15$ и $x = 0.175$ имели форму параллелепипеда с размерами $3 \times 3 \times 4$ и $5 \times 5 \times 8$ мм соответственно, торцы которых были плоскопараллельны с точностью до нескольких секунд; грани образцов были перпендикулярны осям [100], [010] и [001]. Ультразвуковые (УЗ) импульсы на частоте $f = 500\text{--}770$ МГц с длительностью $\tau_u = 0.5\text{--}1$ мкс возбуждались и детектировались стержневыми пьезопреобразователями x - и z -срезов из ниобата лития. Скорости продольных и поперечных УЗ-волн в зависимости от температуры $T = 140\text{--}340$ К измерялись по схеме пьезопреобразователь-образец-пьезопреобразователь.

Модули упругости C_{ij} получены из выражения $C = \rho V^2$, где ρ – плотность образца. Скорость изменения температуры при нагревании и охлаждении образца составляла $\partial T / \partial t = 0.1$ К/мин. Магнитные исследования проводились на SQUID-магнитометре фирмы Quantin Design, позволяющем измерять магнитные моменты с точностью до 0.01. Измерения проводились на незакреплённых образцах $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($x = 0.125, 0.15, 0.175$). Удельное электрическое сопротивление вышеперечисленных образцов в зависимости от температуры и магнитного поля определялось четырёхзондовым методом.

Следует отметить, что при использовании столь высоких акустических частот, одной из причин возникновения акустических аномалий может быть пространственная неоднородность химического состава образца. С этой целью проводился рентгеноспектральный микроанализ

химического состава по La, Sr и Mn на микроанализаторе Superprobe-733 фирмы JEOL. Измерения проводились на нескольких участках образцов размером 120 мкм. Как следует из наших данных, образцы были однородны по химическому составу с точностью до 0.5 ат.%. Ни по одному из элементов: La, Sr и Mn каких-либо неоднородностей в их распределении с точностью до 1 мкм не было выявлено. Полученные данные свидетельствуют о том, что исследуемые образцы по отношению к ультразвуку с частотой $f = 500\text{--}770$ МГц должны вести себя как однородные по объёму монокристаллы.

Результаты и их обсуждение

Образец $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($x = 0.125$)

В результате проведённых нами комплексных экспериментальных исследований в образце $\text{La}_{0.875}\text{Sr}_{0.125}\text{MnO}_3$ были обнаружены температурные изменения величин модулей упругости $(C_{11}-C_{12})/2$ и C_{44} для поперечных и C_{11} для продольных акустических волн в интервале температур $T = 290\text{--}270$ и $T = 180\text{--}150$ К.

При распространении поперечной акустической волны сдвиговый модуль упругости $(C_{11}-C_{12})/2$ значительно уменьшался, начиная с $T = 340$ К, и достигал резкого минимума вблизи $T = 280$ К. При $T < 280$ К наблюдалось возрастание $(C_{11}-C_{12})/2$. При дальнейшем понижении температуры для модуля $(C_{11}-C_{12})/2$ при $T = 160$ К прослеживалось его резкое уменьшение (рис. 1).

Наоборот, с понижением температуры образца, начиная с $T = 340$ К, наблюдалось повышение модуля упругости C_{11} для продольных акустических волн, а вблизи $T_s = 280$ К наблюдался минимум в значении модуля упругости C_{11} , ниже $T = 280$ К значительное уменьшение C_{11} сохранялось (рис. 2).

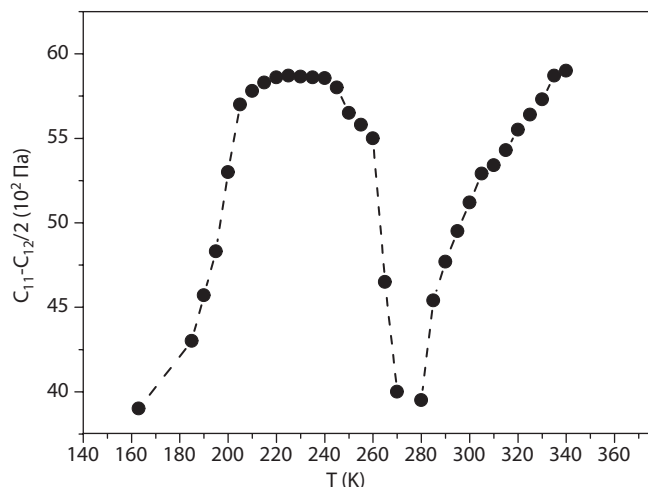


Рис. 1. Температурная зависимость сдвиговых модулей упругости $(C_{11}-C_{12})/2$ для $\text{La}_{0.875}\text{Sr}_{0.125}\text{MnO}_3$.

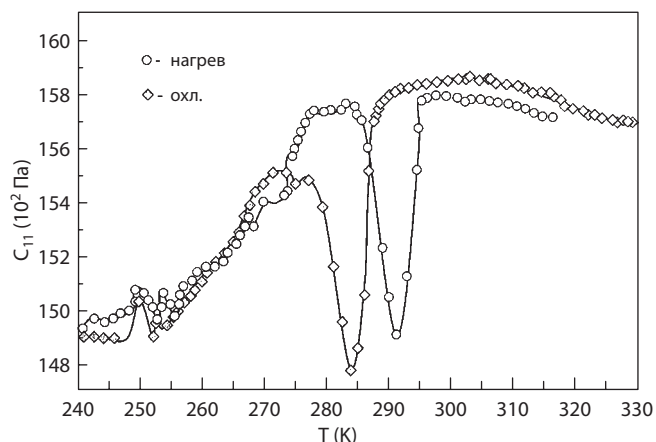


Рис. 2. Температурная зависимость модулей упругости C_{11} для продольных акустических волн для $\text{La}_{0.875}\text{Sr}_{0.125}\text{MnO}_3$.

Этим температурным интервалам изменения модулей упругости C_{11} и $(C_{11}-C_{12})/2$ соответствовали изменения в электросопротивлении (ρ) и намагниченности (M) (рис. 3 и 4). Два минимума в значениях ρ также наблюдались вблизи температур $T_{S1} = 280$ и $T_{S2} = 160$ К.

По результатам, полученным методом дифракции нейтронов, значение T_{S1} было отнесено к структурному фазовому переходу из псевдокубической фазы O^* в орторомбическую O' фазу, а T_{S2} – к переходу обратно из орторомбической в псевдокубическую фазу [3].

Обнаруженные нами температурные гистерезисы в значениях упругих модулей вблизи $T_{S1} = 280$ и $T_{S2} = 160$ К (рис. 2), электрических параметров вблизи $T = 160$ К (рис. 3) позволяют отнести их к структурным фазовым переходам первого рода.

Результаты магнитных измерений (рис. 4) указывают на то, что чисто магнитный переход на данном образце не регистрируется, поскольку он происходит в процессе изменения структуры, т.е. $M(T)$ функция при нагреве

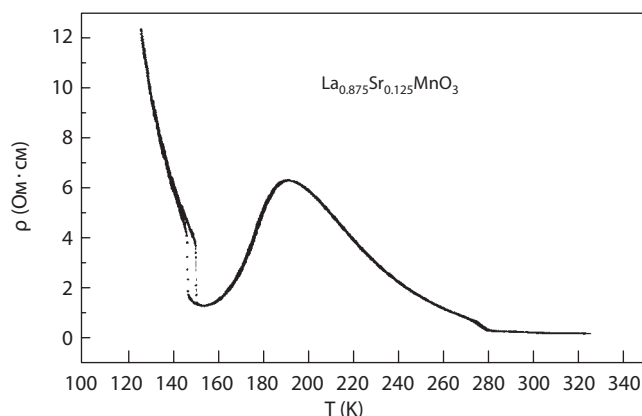


Рис. 3. Температурная зависимость удельного электрического сопротивления ρ для $\text{La}_{0.875}\text{Sr}_{0.125}\text{MnO}_3$.

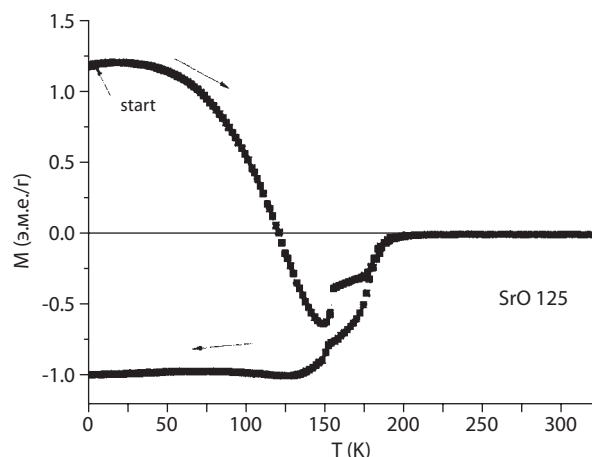


Рис. 4. Температурная зависимость намагниченности M для $\text{La}_{0.875}\text{Sr}_{0.125}\text{MnO}_3$.

отражает, прежде всего, структурные превращения и определить точно температуру Кюри T_c известными методами не представляется возможным.

Образец $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($x = 0.15$)

Главным результатом наших исследований образца $\text{La}_{0.85}\text{Sr}_{0.15}\text{MnO}_3$ стало обнаружение резких изменений в акустических, магнитных и электрических параметрах в температурных интервалах $T = 320-340$, $T = 230-270$ и $T = 170-220$ К.

В первом случае, вблизи температуры $T_{S1} = 320$ К было обнаружено резкое уменьшение модуля упругости для поперечной акустической волны C_{44} (рис. 5), которое регистрируется и в величине электросопротивления (рис. 5). При понижении температуры в интервале $T = 320-280$ К наблюдалось повышение значений C_{44} и ρ . Пиковое падение значения C_{44} наблюдалось при $T = 240$ К.

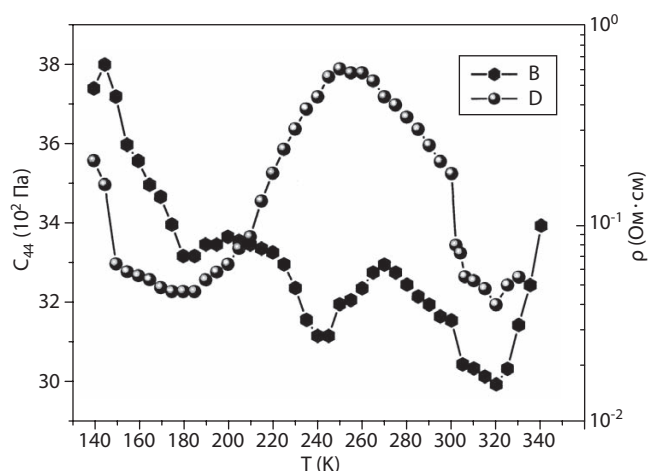


Рис. 5. Температурная зависимость сдвиговых модулей упругости C_{44} (B) и удельного электросопротивления ρ (D) для $\text{La}_{0.85}\text{Sr}_{0.15}\text{MnO}_3$.

Возрастание значения C_{44} сменилось на его резкое уменьшение вблизи $T = 180$ К и небольшое его уменьшение при $T = 140$ К.

Подобные температурные изменения значений C_{11} были менее значительны.

Обнаруженные резкие изменения в акустических параметрах C_{44} соответствуют температурным изменениям в электросопротивлении ρ и намагнитченности M , которые хорошо совпадают с полученными данными для образцов данного состава [4].

Образец $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($x = 0.175$)

Нами также было изучено распространение поперечных и продольных УЗ-волн в образце $\text{La}_{0.875}\text{Sr}_{0.175}\text{MnO}_3$. В результате были обнаружены резкие изменения параметров сдвиговых модулей упругости C_{44} вблизи $T = 310$, 285 и 200 К.

Изменение параметров C_{44} в окрестности $T = 285$ К имели безгистерезисный характер и соответствовали фазовому переходу из парамагнитного в ферромагнитное состояние, что подтверждается и магнитными измерениями, выполненными нами на том же образце [5].

Изменения величин C_{44} и C_{11} вблизи $T = 300$ – 310 и 200 – 210 К имеют гистерезисный характер, что позволило отнести их к структурным фазовым переходам, вероятно, из ромбоэдрического в орторомбическое состояние в парамагнитной и ферромагнитной фазах. В парамагнитной фазе $T = 310$ К происходит неполное изменение ромбоэдрической структуры в орторомбическую, окончательно установление орторомбической структуры происходит при втором структурном переходе $T = 200$ К уже в ферромагнитной фазе.

Гистерезисный характер изменений модулей упругости C_{44} и C_{11} вблизи $T = 310$ К можно отнести к возможному фазовому переходу первого рода, который ранее не был обнаружен.

При приложении магнитного поля в 1 Тл фазовый переход при $T = 310$ К для всех упругих мод сдвигался в сторону более низких, а магнитный при $T = 285$ К – в сторону более высоких температур.

Приведённые экспериментальные данные позволяют сделать ряд предположений как о характере ян-теллеровских (ЯТ) искажений в слаболегированных лантан-стронциевых манганитах, так и об их влиянии на транспортные процессы.

Во-первых, из особенностей обнаруженных акустических аномалий следует, что при понижении температуры, происходит возникновение деформаций самих октаэдров MnO_6 с локальным близкодействующим упорядочением среди октаэдров. Эти искажения не изменяют общую симметрию кристаллов и поэтому практически плохо обнаруживаются другими методами. Однако подобные локальные искажения ЯТ-типа ответственны за увеличение электрического сопротивления в данном температурном диапазоне. Во всём диапазоне нелегированных и слаболегированных манганитов ($0 < x < 0.20$) искажения октаэдров и их локальное упорядочение происходит в парамагнитной фазе, причём температура начала ЯТ-искажений, также как и их интенсивность, снижается с ростом концентрации ионов Sr от температуры 1050 К (при $x = 0$).

При дальнейшем понижении температуры существуют два сценария в характере ЯТ-искажений в зависимости от величины x . При $x \leq 0.15$ возникает кооперативное по всему объёму кристалла упорядочение искажённых октаэдров MnO_6 . Этот процесс сопровождается структурным фазовым переходом первого рода. Его температура также понижается с увеличением допирования от 730 К ($x = 0$) до 280 К ($x = 0.15$).

Для образцов с $x \geq 0.15$, вследствие возрастания T_c , не возникает кооперативного упорядочения искажённых октаэдров MnO_6 , а сразу происходит подавление локальных ЯТ-искажений с возрастанием спонтанной намагнитченности. Такое подавление ЯТ-искажений также сопровождается фазовым переходом первого рода типа “порядок-беспорядок”. Для всех образцов $0.10 \leq x \leq 0.20$ увеличение ЯТ-искажений приводит к повышению электрического сопротивления и смягчению модулей упругости.

Оба вида ЯТ-искажения (локальный и кооперативный) уменьшаются с ростом магнитного упорядочения и увеличением подвижности носителей заряда. Поскольку температура ферромагнитного упорядочения T_c увеличивается с ростом x от 130 К ($x = 0.1$) до 240 К ($x = 0.15$), для образцов с $x \leq 0.15$ этот процесс происходит одновременно со структурным фазовым переходом первого рода.

Энергетически процесс подавления локальных ЯТ-искажений с ростом магнитного упорядочения требует значительно меньших затрат, чем подавление кооперативного упорядочения. Это подтверждается характером температурных аномалий в теплоёмкости. Поэтому процесс подавления кооперативных ЯТ-искажений происходит постепенно в большом температурном интервале, чем и обуславливается малое значение колоссального магнито-

сопротивления (КМС) для $x \leq 0.15$. Наоборот, подавление локальных ЯТ-искажений происходит в узком температурном интервале и приложении внешнего магнитного поля, сравнимого и даже превышающего значение спонтанной намагниченности, приводит к резкому подавлению локальных ЯТ-искажений. Этот процесс характерен для образцов с $x \geq 0.15$, когда несколько выше T_c происходит значительное уменьшение сопротивления и уменьшение затухания упругих волн. Эти процессы усиливаются приложением магнитного поля. Это предположение находит подтверждение в схожести температурных интервалов аномалий в теплоёмкости, упругих параметров и КМС для образцов с $x = 0.15$ и $x = 0.175$.

Авторы выражают благодарность М. И. Куркину из Института физики металлов УрО РАН за полезные

обсуждения экспериментальных результатов. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 08-02-00904а).

Литература

1. Кугель К.И., Хомский Д.И.: УФН **136**, 621–662 (1982)
2. Michev V., Karchev N.: Phys. Rev. B **80**, 012403(1–4) (2009)
3. Yamada V., Suzuki J., Oikawa K., Katano S., Fernandez-Baca J.A.: Phys. Rev. B **62**, 11600–11608 (2000)
4. Zainullina R.I., Bebenin N.G., Burkhanov A.M., Ustinov V.V., Mukovskii Ya.M.: Phys. Rev. B **66**, 064421(1–5) (2002)
5. Богданова Х.Г., Булатов А.Р., Голенищев-Кутузов В.А., Елохина Л.В., Королёв А.В., Нейфельд Э.А., Шакирзянов М.М.: ФТТ **45**, 284–289 (2003)

Использование различных технологий распараллеливания при вычислении спектров ЭПР

С. К. Черников, И. В. Русских, А. В. Рябинин

Лаборатория моделирования физико-механических процессов и систем

В работе продемонстрировано применение некоторых технологий распараллеливания (OpenMP, MPI, CUDA) для расчётов спектров электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) реакционных центров (РЦ) фотосистемы 1. Приведены результаты расчётов спектров при использовании SMP-компьютеров (Symmetric MultiProcessing), кластеров и графических процессоров.

Введение

Распараллеливание алгоритмов и программ в настоящее время является магистральным направлением повышения производительности вычислений. В первую очередь это обусловлено тем, что большинство доступных пользователю вычислительных ресурсов позволяют реализовывать параллельные вычисления. На примере вычисления спектра электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) реакционного центра (РЦ) фотосинтеза обсудим особенности технологий распараллеливания этого алгоритма для трёх групп таких устройств: SMP-компьютеров (Symmetric MultiProcessing), кластеров и графических процессоров.

В алгоритме определения спектра ЭПР РЦ вычисляемое значение интенсивности спектра находится как некоторая комбинация элементов матрицы плотности $\rho(t)$, которая, в свою очередь, определяется из системы уравнений

$$\hat{L}_{\text{eff}}|\rho(t)\rangle = |\rho(0)\rangle. \quad (1)$$

Матрица $\hat{L}_{\text{eff}}$, имеющая порядок 16×16 , формируется из гамильтониана $\hat{H}_{\text{mw}}$, описывающего взаимодействие между электроном и дыркой, взаимодействие электрон-дырочной пары с внешним магнитным полем и магнитными ядрами РЦ. Сверхтонкое взаимодействие (взаимодействие электрон-дырочной пары с магнитными ядрами РЦ) в рассматриваемом подходе учитывается случайными параметрами с известными характеристиками распределения. Для оценки влияния сверхтонкого взаимодействия на наблюдаемое значение интенсивности спектра используется метод Монте-Карло. Наблюдаемое значение интенсивности спектра находится как математическое ожидание в результате многократного решения системы (1) с различными значениями характеристик сверхтонкого взаимодействия.

Описанные операции легко реализовать в виде подпрограммы `getSpectra` (`eprr`, `b0`, `theta`, `phi`), результатом

работы которой будут интенсивности спектра донора и акцептора (массив `eprr`), определяемые для заданной напряжённости внешнего поля `b0` и углов ориентации РЦ относительно поля `theta` и `phi`.

Отметим, что матрица $\hat{L}_{\text{eff}}$ существенно зависит от ориентации РЦ относительно внешнего магнитного поля, т.е. угловых параметров Ω . Предположив, что при любом эксперименте мы одновременно имеем дело с большим числом произвольно ориентированных относительно внешнего поля РЦ, найдём наблюдаемую интенсивность спектра как среднее по всем возможным направлениям.

Для исследования РЦ методами ЭПР-спектроскопии наиболее важной характеристикой является форма спектра, поэтому интенсивность спектра приходится вычислять многократно для различных значений напряжённости внешнего магнитного поля из некоторого заданного диапазона. Последовательная фортран-программа, реализующая описанный выше алгоритм, приведена в листинге 1.

Отметим, что для получения спектра, сопоставимого по точности с экспериментальным, в этой программе приходится последовательно, многократно (до 10^{11} раз) формировать и решать систему уравнений (1), что занимает существенное время. В то же время задача сравнительно легко распараллеливается.

Технология OpenMP

Для многоядерных и многопроцессорных персональных SMP-компьютеров с общей памятью распараллеливание приведённого выше алгоритма наиболее просто обеспечить, воспользовавшись технологией OpenMP [1]. Эта технология задумана как стандарт для программирования на масштабируемых SMP-системах в модели общей памяти. В стандарт OpenMP входят спецификации набора директив компилятора, процедур и переменных среды. За счёт идеи “инкрементального распараллеливания” OpenMP идеально подходит для разработчиков, желающих быстро

Листинг 1.

```

program RC
{объявление используемых модулей и
переменных}
! открываем файл результатов
open(10,file='spectra.res',form='formatt
ed',status='unknown')
call randini(0) ! инициализация
генератора случайных чисел.
{ввод данных}
do k=1,kmax ! Цикл по B0
  b0 = b0min + (k-1)*(b0max-b0min)/
  float(kmax-1)
  epr(1)=0
  epr(2)=0
  do isph = 1, numsph ! Цикл по всем
  ориентациям PЦ
    t = (db1e(isph) - 0.5)/numsph
    thetta = acos(t)
    phi = dsqrt(pi*numsph)*asin(t)
    Call getSpectra(epr,r,b0,thetta,
    phi)
    epr(1) = epr(1)+epr(r(1)
    epr(2) = epr(2)+epr(r(2)
  end do ! конец цикла по ориентациям
  PЦ
! запись результатов
  write(10,'(4(3x,E16.8))')
  b0,epr(1),epr(2),epr(1)+epr(2)
End do ! конец цикла по B0
end program RC

```

распараллелить свои вычислительные программы с большими параллельными циклами. Разработчик не создаёт новую параллельную программу, а просто добавляет в текст последовательной программы OpenMP-директивы. При этом OpenMP – достаточно гибкий механизм, предоставляющий разработчику большие возможности контроля над поведением параллельного приложения. OpenMP-программа на однопроцессорной платформе может быть использована в качестве последовательной программы, т.е. нет необходимости поддерживать последовательную и параллельную версии. Директивы OpenMP просто игнорируются последовательным компилятором. OpenMP поддерживает работу с языками FORTRAN и C/C++. Ниже в листинге 2 приведена нотация параллельной фортран-программы вычисления интенсивности спектра, полученная из последовательного кода, приведённого в листинге 1.

В этой программе (листинг 2) выделенные жирным шрифтом добавленные директивы OpenMP сообщают компилятору, что находящийся внутри них код (цикл по ориентациям PЦ) выполняется параллельно. Степень параллелизма устанавливается в зависимости от числа доступных вычислительных ядер в компьютере автоматически. Отметим, что в настоящее время большинству пользователей доступны устройства, обеспечивающие параллельные вычисления на 2–12 ядрах.

Листинг 2.

```

program RC_OMP_MAIN
{объявление используемых модулей и
переменных}
! открываем файл результатов
open(10,file='spectra.res',form='formatt
ed',status='unknown')
{ввод данных}
do k=1,kmax ! Цикл по B0
  call randini(0) ! инициализация
генератора случайных чисел.
  b0 = b0min + (k-1)*(b0max-b0min)/
  float(kmax-1)
  epr(1)=0.0
  epr(2)=0.0
!$OMP PARALLEL
PRIVATE(thetta,phi,t,epr) SHARED(epr)
!$OMP DO REDUCTION (+: epr)
  do isph = 1,numsph ! Цикл по всем
  ориентациям PЦ
    t = (db1e(isph) - 0.5)/numsph
    thetta = acos(t)
    phi = dsqrt(pi*numsph)*asin(t)
    Call getSpectra(epr,r,b0,thetta,
    phi)
    epr(1) = epr(1)+epr(r(1)
    epr(2) = epr(2)+epr(r(2)
  end do !конец цикла по ориентациям
  PЦ
!$OMP END PARALLEL
! запись результатов
  write(10,'(4(3x,e16.8))')
  b0,epr(1),epr(2),epr(1)+epr(2)
end do !конец цикла по B0
end program RC_OMP_MAIN

```

Технология MPI

При использовании для вычислений многопроцессорных вычислительных систем с распределённой памятью (кластеров) для распараллеливания алгоритмов можно воспользоваться технологией MPI (Message Passing Interface) [2]. В рамках этой технологии в процессе вычислений узлы кластера обмениваются сообщениями. MPI представляет собой библиотеку, которая определяет имена, вызовы процедур и результаты их работы. Программы, которые могут быть написаны на FORTRAN, C/C++ и PASCAL, компилируются обычными компиляторами и связаны с MPI-библиотекой. В модели передачи сообщений процессы, выполняющиеся параллельно, имеют отдельные адресные пространства. Связь происходит, когда какой-либо процесс выполняет операцию передачи сообщения, а другие процессы (процесс) – операцию его получения.

Применительно к рассматриваемой задаче распараллеливание алгоритма будет заключаться в разделении между узлами кластера процесса вычисления среднего значения интенсивности спектра по направлениям ориентации PЦ. После завершения своей порции вычис-

Листинг 3.

```

program RC_MPI
include 'mpif.h'
{объявление используемых модулей и
переменных}
call MPI_INIT(ierr)
call MPI_COMM_SIZE(MPI_COMM_WORLD,
mtask, ierr)
call MPI_COMM_RANK(MPI_COMM_WORLD,
ntask, ierr)
! открываем файл результатов
if(ntask.eq.0) open(10,file='spectra.res
',form='formatted',status='unknown')
{ввод данных}
do k=1,kmax ! Цикл по B0
call randini(ntask*nummonte) !
инициализация генератора случайных
чисел.
b0 = b0min + (k-1)*(b0max-b0min)/
float(kmax-1)
epr(1)=0
epr(2)=0
if (ntask.eq.mtask-1) then
nbeg=ntask*int(numsph/mtask)+1
nend=numsph
else
nbeg=ntask*int(numsph/mtask)+1
nend=(ntask+1)*int(numsph/mtask)
end if
do isph = nbeg,nend ! Цикл по всем
ориентациям РЦ
t = (dble(isph) - 0.5)/numsph
thetta = acos(t)
phi = dsqrt(pi*numsph)*asin(t)
call getSpectra(epr,b0,thetta,
phi)
end do ! конец цикла по всем
ориентациям РЦ
call MPI_REDUCE(epr, epr,2,MPI_
DOUBLE_PRECISION, MPI_SUM,& 0, MPI_
COMM_WORLD, ierr)
! запись результатов
if (ntask.eq.0) then
write(10,'(4(3x,E16.8))')
b0,epr(1),epr(2),epr(1)+epr(2)
end if
end do ! конец цикла по B0
call MPI_FINALIZE(ierr)
end program RC_MPI

```

лений узлы кластера должны обмениваться результатами для окончательного вычисления интенсивности спектра. Нотация параллельной фортран-программы, полученной из последовательного кода (листинг 1) и реализующей описанный параллельный алгоритм с использованием технологии MPI, приведена в листинге 3.

В приведённой нотации жирным шрифтом показаны изменённые либо добавленные строки кода, превращающие последовательную программу (листинг 1) в параллельную. Как видно из листинга 3, изменения в MPI-программе более значительные по сравнению с

изменениями программы, использующей технологию OpenMP.

Отметим, что выполнение программ, написанных в технологии MPI, осуществляется с помощью специальной программы запуска, вызываемой либо командной строкой, либо через специальную оконную надстройку. Параллельные программы, написанные по технологии MPI, могут эффективно использоваться как на кластерах, так и на SMP-компьютерах. Хотя использование кластеров предоставляет теоретически неограниченные возможности масштабирования рассматриваемой задачи, реальное ускорение процесса счёта возможно при использовании 10–20 ядер.

Технология CUDA

CUDA (Compute Unified Device Architecture) [3] – технология GPGPU (General-Purpose Computing on Graphics Processing Units), позволяющая программистам реализовывать на упрощённом языке программирования Си-алгоритмы, выполняемые на графических процессорах ускорителей компании Nvidia GeForce: GeForce 8 Series, GeForce 9 Series, GeForce 200 Series, Nvidia Quadro и Tesla. Фактически CUDA позволяет включать в текст Си-программы специальные функции, которые пишутся на упрощённом языке программирования Си и выполняются на графическом процессоре. CUDA даёт разработчику возможность по своему усмотрению организовывать доступ к набору инструкций графического ускорителя, управлять его памятью и организовывать на нём сложные параллельные вычисления. Графический ускоритель с поддержкой CUDA становится мощной программируемой открытой архитектурой, приближаясь к сегодняшним центральным процессорам, а порой и превосходя последние по производительности. Доступные видеокарты в настоящее время включают в себя сотни процессоров.

Рассмотрим процедуру распараллеливания алгоритма вычисления интенсивности спектра по технологии CUDA. При реализации алгоритмов CUDA обеспечивает два уровня параллелизма: параллелизм выполнения блоков вычислений и параллелизм потоков в каждом блоке. Понимая под блоком вычисление интенсивности спектра при заданном значении b_0 , программа вычисления спектра в нотации языка C++ примет вид, приведённый в листинге 4.

Приведённый выше код компилируется обычным компилятором C++ и осуществляет только ввод данных и вызов выполняемой на графическом устройстве процедуры GPProcPC. Процедура GPProcPC, код которой приведён в листинге 5, в параллельном режиме осуществляет вычисление полевого спектра РЦ. Строка кода, вызывающая процедуру GPGPUProc <<< dimBlock, dimThread >>> (data, device_result), определяет характер распараллеливания процесса вычислений, задавая число параллельно обрабатываемых блоков dimBlock и число

Листинг 4.

```
// program RC_CUDA
Extern void GPProcPC (input_data
data, double* res);

Int main()
{
    input_data data;
    {... ввод данных и формирование
    структуры data ...}
    Double* res = new double[kmax *
    2];
    // вызов процедуры вычисления на
    графическом устройстве
    GPProcPC(data, res);
    {... сохранение результатов...}
}
```

параллельных потоков в блоке dimThread. Отметим, что количество физически параллельно обрабатываемых блоков определяется возможностями устройства вне зависимости от заданного dimBlock. Все процедуры, приведённые в листинге 5, компилируются специальным компилятором CUDA. Очевидно, что в случае использования технологии CUDA потребуются существенные переделки исходной последовательной программы, даже если её код написан на языке C/C++.

Заключение

Время, необходимое для расчёта спектра, сопоставимого по точности с экспериментальным, для различных вариантов параллельных программ, описанных выше, приведено в таблице 1.

Таким образом, при сопоставимой производительности наименьшие трудности при распараллеливании программ, аналогичных рассмотренной, возникают при использовании технологии OpenMP. Быстрый рост числа вычислительных ядер на доступных SMP-компьютерах делает эту технологию распараллеливания весьма привлекательной.

Технология MPI так же позволяет без существенных усилий превратить последовательную программу в параллельную, ориентированную на использование на кластерах. Однако плохая масштабируемость задачи и быстрое моральное старение этих вычислительных устройств одновременно с существенными затратами на их реновацию не вызывают большого энтузиазма.

Наконец, технология CUDA, требующая кардинальной переделки кода, при затратах на оборудование, сопоставимых со стоимостью процессора для SMP-компьютера, вряд ли может быть рекомендована для написания программ не профессиональными программистами, которыми чаще всего и являются разработчики прикладных алгоритмов, аналогичных рассмотренному в настоящей работе.

Листинг 5.

```
#include <cuda.h>
#include <cuda_runtime.h>
#define nThread 256

void GPProcPC (input_data data, double*
res)
{
    double* device_result; // Выделение
    памяти под результат
    cudaMalloc((void*)&device_result, km
    ax*nThread*2*sizeof(double));
    dim3 dimBlock(kmax); // задание
    количества блоков
    dim3 dimThread(nThread); // задание
    количества потоков в блоке
    GPGGridProc <<< dimBlock, dimThread
    >>> (data, device_result);
    cudaThreadSynchronize(); // ожидание
    окончания всех вычислений
    // копирование результатов в ОЗУ
    cudaMemcpy(res, device_result,
    kmax*2*sizeof(double),
    cudaMemcpyDeviceToHost);
    cudaFree(device_result);
}

_global_Void GPGGridProc (input_data
data, double* result)
{
    _shared_double reduce[nThread*2];
    {... объявление используемых
    переменных ...}
    int ipotok = threadIdx.x; //
    определение индекса потока в блоке
    int k = blockIdx.x; // определение
    индекса блока
    b0 = b0min+(k-1)*(b0max-b0min)/
    ((double)kmax-1);
    randini(ipotok, k); // инициализация
    генератора случайных чисел
    Int nbeg = (numsp/nThread)*iblock;
    Int nend = nbeg+numsp/nThread;
    for(isph = nbeg; isph < nend;
    isph++) // Цикл по всем ориентациям
    PC
    {
        t = (double(isph)-0.5)/numsp;
        theta = acos(t);
        phi = sqrt(pi*numsp)*asin(t);
        getSpectra(epr, b0, theta,
        phi);
    }
    reduce[ipotok*2] = epr[0];
    reduce[ipotok*2+1] = epr[1];
    _syncthreads(); //барьерная
    синхронизация потоков
    // сбор результатов всех потоков
    блока в два значения и
    // запись результата в глобальную
    память[4]
    reduce_result(result, reduce);
}
```

Таблица 1. Время, необходимое для расчёта спектра, на различных устройствах.

Вычислительное устройство	Количество процессоров (ядер)	Технология распараллеливания	Время решения (мин)
Персональный компьютер (процессор Intel PIII Xeon 2.83GHz)	(4)	OpenMP	352
Кластер (процессоры IBM PowerPC 970 1.6 GHz, коммуникационная среда Myrinet)	5(10)	MPI	226
	10(20)	MPI	113
	15(30)	MPI	164
Графический процессор NVidia GTX 260	(216)	CUDA	180

Авторы выражают глубокую благодарность коллективу Казанского филиала Межведомственного суперкомпьютерного центра РАН и лично Д. В. Чачкову за помощь, оказанную в проведении расчётов на кластере.

Литература

1. Антонов А.С.: Параллельное программирование с использованием технологии OpenMP. М.: Изд-во МГУ 2009. 77 с.
2. Немнюгин С.А., Стесик О.Л.: Параллельное программирование для многопроцессорных вычислительных систем. СПб.: БХВ-Петербург 2002. 400 с.
3. CUDA Programming Guide Version 2.3.1. (http://developer.download.nvidia.com/compute/cuda/2_3/toolkit/docs/)
4. NVIDIA_CUDA_Programming_Guide_2.3.pdf, NVIDIA Corporation 2009.
5. Mark Harris. Optimizing Parallel Reduction in CUDA. (http://developer.download.nvidia.com/compute/cuda/1_1/Website/projects/reduction/doc/reduction.pdf), NVIDIA Corporation 2009.

Применение метода ЭПР для оценки уровня продукции оксида азота в мозге крыс при ишемическом инсульте

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

Отдел медицинской физики, лаборатория биофизики; отдел химической физики, лаборатория спиновой физики и спиновой химии

Методом ЭПР проведены исследования содержания оксида азота в разных отделах мозга крыс при искусственно вызванном ишемическом инсульте. Найдено, что при ишемическом инсульте происходит резкое снижение продукции оксида азота во всех исследованных областях мозга. Максимальное снижение наблюдается в ишемизированной части коры левого полушария: содержание NO в составе спиновой ловушки уменьшается примерно в 5 раз. Примерно 50%-снижение наблюдается в других областях мозга. Снижение продукции NO сохраняется как минимум в течение суток после инсульта; через 72 часа наблюдается частичное восстановление содержания NO во всех областях, кроме ядерной зоны ишемии.

Введение

В настоящее время развитие ишемии мозга и последующее возникновение инсульта связывают с нарушениями мозгового кровотока, а также с нарушениями в его регуляции системой оксида азота [1–3]. Система оксида азота (NO) является одной из наиболее изучаемых сигнальных систем организма. В мозге NO постоянно продуцируют конститутивные изоформы NO-синтаз (NOS): эндотелиальная (eNOS), нейрональная (nNOS) и митохондриальная (mtNOS) [4–7]. В патологических условиях клетки мозга и иммунной системы способны экспрессировать индуцибельную изоформу фермента (iNOS), активность которой выше в 50–100 раз по сравнению с конститутивными изоформами и не зависит от содержания кальция в клетке [8–10].

Встаёт вопрос об использовании современного метода обнаружения и количественного определения содержания NO в тканях живых организмов, в частности, в разных отделах мозга животных в норме и при экспериментальном моделировании патологий. В последнее время одним из наиболее эффективных методов обнаружения и количественного определения NO в биологических тканях стал метод электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) [11, 12]. Это произошло благодаря методике, разработанной А. Ф. Ваниным и др. [13], в которой они использовали метод спинового захвата, который основан на реакции радикала (в данном случае NO) со спиновой ловушкой. В результате реакции образуется аддукт с характерным спектром ЭПР. А. Ф. Ванин с сотрудниками применили комплекс Fe^{2+} с диэтилдитиокарбаматом (ДЭТК) для захвата NO и формирования устойчивого тройного комплекса $(\text{ДЭТК})_2\text{-Fe}^{2+}\text{-NO}$ в различных тканях животных [13]. Эти комплексы характеризуются легко распознаваемым спектром ЭПР со значением g -фактора $g = 2.035\text{--}2.040$ и триплетной сверхтонкой структурой.

Целью нашего исследования является измерение динамики содержания NO этим методом в разных отделах

мозга крыс при фокальном инсульте: отдельно в очаге ишемии левого полушария, оставшейся части левого полушария; и в условно не затетых ишемией регионах – правом полушарии и мозжечке.

Методика эксперимента

Работу выполняли на крысах популяции Wistar весом 350–400 г. Фокальный инсульт моделировали (эта часть исследования проведена сотрудниками факультета фундаментальной медицины МГУ С. А. Гавриловой и А. В. Голубевой под руководством проф. В. Б. Кошелева) по модифицированной методике Chen, опубликованной в 1989 г. [14]. Все манипуляции выполняли на крысах, наркотизированных хлоралгидратом в дозе 400 мг/кг. Ловушку NO вводили через 5, 9, 24, 72 часа после моделирования инсульта животным, затем 30 мин ждали накопления сигнала и выполняли эвтаназию. В пластиковых контейнерах замораживали фрагменты мозга: отдельно область ишемии коры левого полушария; оставшуюся часть коры левого полушария; кору правого полушария мозга; мозжечок – всего 4 пробы мозга от каждого животного. В каждой временной точке в каждой группе проводили по 6 измерений, общее число животных равно 30. Масса образцов составляла около 100 мг.

При подготовке образцов для измерения ЭПР-спектров мы опирались на методику спиновых ловушек [11]. Как и ранее [15], мы вводили ДЭТК-Na внутрибрюшинно в дозе 500 мг/кг в 2.5 мл воды. Смесь растворов: сульфата железа ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, Sigma, USA) в дозе 37.5 мг/кг и цитрата натрия в дозе 187.5 мг/кг (в объёме 1 мл воды на 300 г веса животного), приготовленную непосредственно перед введением, вводили подкожно в три точки – правое и левое бедро и в холку. В смеси сульфата железа и цитрата натрия образуется цитрат железа. ДЭТК-Na и цитрат железа распределяются по организму и при взаи-

модействии образуют нерастворимый в воде комплекс ДЭТК- Fe^{2+} , который способен взаимодействовать с NO с образованием стабильного радикала $(\text{ДЭТК})_2\text{-Fe}^{2+}\text{-NO}$, который может быть зарегистрирован методом ЭПР-спектроскопии.

Измерения спектров комплекса $(\text{ДЭТК})_2\text{-Fe}^{2+}\text{-NO}$

Измерения проводили на спектрометре ER 200E SRC фирмы Брукер в X-диапазоне (9.50 ГГц) с модуляцией магнитного поля 100 кГц, амплитудой модуляции 2 Гс, мощностью СВЧ-излучения 30 мВт, с временной константой 200 мс, при температуре 77 К в пальчиковом дюаре фирмы Брукер. Амплитуда модуляции, усиление и мощность СВЧ во всех экспериментах были одинаковы. Для контроля расхождения этих параметров при смене образцов использовали реперный образец (уголь, $\Delta H_{\text{pp}} = 5.2$ Гс, $g \sim 2.0$), помещённый во вторую ячейку резонатора типа TE 104. Образцы позиционировали в резонаторе, согласно методике, предложенной в [16]. Интенсивность сигнала от реперного образца при смене исследуемых образцов изменялась не более чем на 8–10% и учитывалась при определении интенсивности сигналов исследуемых образцов. Сигнал ЭПР от каждого образца проходил процедуру цифрового фазочувствительного детектирования (ФЧД) и в специально написанной программе среды разработки LabView 5.3 был трижды накоплен ($S/N = 500$ при 10^{13} спинов) [17].

Поскольку интегральная интенсивность сигналов ЭПР пропорциональна концентрации парамагнитных частиц, ответственных за эти сигналы [18], это дало возможность рассчитать содержание NO в образцах ткани.

Статистическая обработка результата

Усреднённые данные представлены в виде среднего значения $\pm$ стандартное отклонение. Статистическая обработка результатов проведена с применением t-критерия Стьюдента с проверкой исходных данных на нормальность распределения. Различия считаются значимыми при $p < 0.05$.

Результаты измерений спектров ЭПР мозга крыс при ишемическом инсульте и их обсуждение

Сравнение полученных спектров со спектром ЭПР эталонного образца (рис. 1) позволяет выделить в наблюдаемых спектрах сигналы ЭПР комплекса $(\text{ДЭТК})_2\text{-Fe}^{2+}\text{-NO}$. Во всех проведённых измерениях, кроме сигнала от NO в составе спиновой ловушки, мы также наблюдали сигнал от NO в составе R-конформера [10, 19]. На рис. 2 и 3 приведены типичные спектры ЭПР замороженных образцов мозга крысы после инсульта.

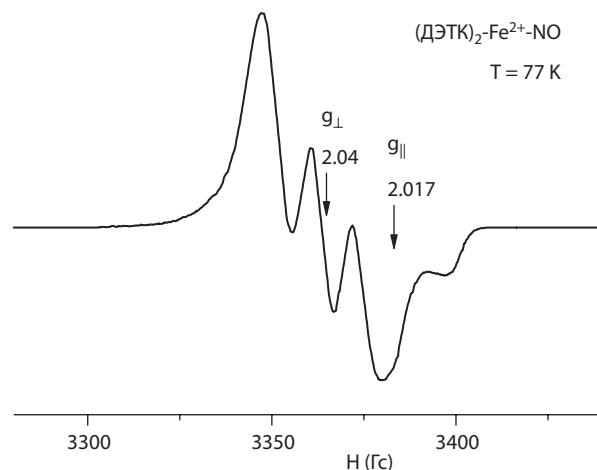


Рис. 1. Сигнал ЭПР эталонного образца, $(\text{ДЭТК})_2\text{-Fe}^{2+}\text{-NO}$.

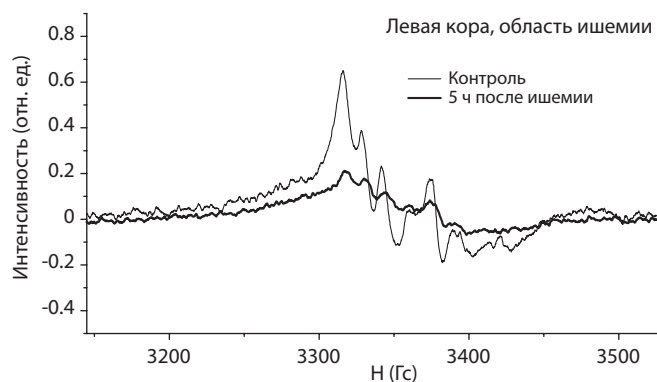


Рис. 2. Сигналы ЭПР образца коры левого полушария (область ишемии) здоровой крысы (контроль) и крысы после инсульта (5 часов после ишемии).



Рис. 3. Сигналы ЭПР образца коры правого полушария здоровой крысы (контроль) и крысы после инсульта (5 часов после ишемии).

Искусственно вызванный инсульт привёл к снижению содержания NO в очаге некроза в составе спиновой ловушки примерно в 5 раз (рис. 2). Через 5, 9 и 24 ч после инсульта в коре правого полушария и неишемизированной части коры левого полушария содержание NO

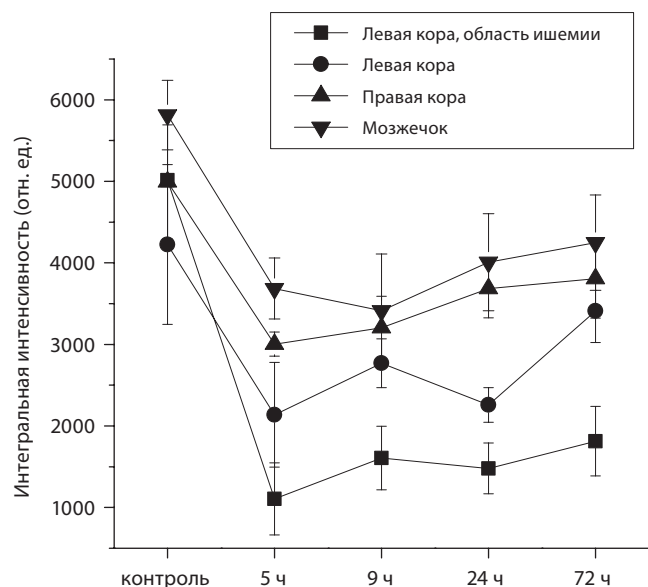


Рис. 4. Изменение относительного содержания NO в разных областях мозга крысы после инсульта.

в составе спинной ловушки уменьшилось на 40–50% по сравнению с контролем (рис. 3). В мозжечке содержание NO уменьшилось на 30%. Спустя трое суток после моделирования инсульта в мозжечке и неишемизированных частях коры полушарий наблюдали частичное восстановление содержания NO в составе спинной ловушки, в ишемизированной части коры левого полушария восстановления содержания NO в составе спинной ловушки не происходит (рис. 4).

Данные литературы показывают, что уже через 10 мин от начала ишемии мозга отмечают увеличение активности nNOS, с максимумом через 3 ч. Такой ответ связывают с активацией глутаматэргической системы и считают причиной самого раннего повреждения нейронов. Активация iNOS появляется в проблемном регионе через 12 ч от начала ишемии с пиком реакции через 48 часов. Индуцибельная изоформа фермента сопровождается развитием воспалительной реакции и обеспечивает отставленное повреждение в мозге, основным повреждающим производным NO в этом случае является пероксинитрит. Через час ишемической атаки повышается активность и сохраняется до суток eNOS. Работа фермента приводит к вазодилатации сосудов и способствует уменьшению поражения [1, 3, 20].

Исходя из вышесказанного, следует ожидать увеличения содержания NO в тканях мозга и крови в течение первых трёх суток от начала ишемии. Однако прямое измерение содержания NO в тканях мозга выполнить сложно из-за короткой жизни этой молекулы и малой её концентрации, поэтому об изменении NO при ишемии судят по косвенным данным: увеличению цГМФ в клетке; увеличению активности NOS, выделенных из ишемизированных тканей и др. [8, 21]. Принято считать,

что содержание нитритов и нитратов отражает активность системы NO, и их концентрацию измеряют в виду простоты методики в крови, моче и тканях. Осложняет картину тот факт, что механизмы и скорость утилизации оксида азота не изучены.

Проведённое нами исследование методом ЭПР-спектроскопии показало снижение продукции NO в составе спинной ловушки через 5, 9 и 24 ч от начала инсульта во всех регионах мозга: в очаге ишемии левого полушария, в оставшейся части левого полушария, в условно не задетых ишемией регионах: коре правого полушария и мозжечке. Через 72 ч после инсульта наблюдалось начало восстановления содержания NO во всех областях, кроме ядерной зоны ишемии. Таким образом, наши результаты позволяют дать общую картину динамики NO при ишемическом инсульте.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки (грант ГК 02.512.12.2013) и РФФИ (грант № 09-04-97020-р_Поволжье_a).

Литература

1. Башкатова В.Г., Раевский К.С.: Биохимия **63**(7), 1020–1028 (1998)
2. Манухина Е.Б., Малышев И.Ю.: Биохимия **63**(7), 992–1006 (1998)
3. Самойленкова Н.С., Гаврилова С.А., Кошелев В.Б.: Докл. Акад. наук **414**(2), 283–285 (2007)
4. Ванин А.Ф.: Биохимия **63**(7), 924–938 (1998)
5. Реутов В.П., Сорокина Е.Г.: Биохимия **63**(7), 1029–1040 (1998)
6. Li H., Wallerath T., Forstermann U.: Nitric Oxide **7**, 132–147 (2002)
7. Nisoli E., Carruba M.O.: J. Cell Sci. **119**, 2855–2862 (2006)
8. Yun H.-Y., Dawson V.L., Dawson T.M.: Crit. Rev. Neurobiol. **10**, 291–316 (1996)
9. Tuteja N.N., Chandra M., Tuteja R., Misra M.K.: J. Biomed. Biotech. **4**, 227–237 (2004)
10. Реутов В.П., Охотин В.Е., Щуклин А.В., Сорокина Е.Г., Косицын Н.С., Гуринов В.Н.: Успехи физиол. наук **38**(4), 39–58 (2007)
11. Ванин А.Ф., Маленкова И.В., Мордвинцев П.И., Мюльш А.Ф.: Биохимия **58**, 1094–1103 (1993)
12. Khramtsov V.V., Volodarsky L.B.: Biol. Magnet. Reson. **14**, 109–180 (1998)
13. Vanin A.F., Mordvintsev P.I., Kleshchev A.L.: Studia Biophys. **107**, 135–142 (1984)
14. Chen S.T., Hsu C.Y., Hogan E.L.: Stroke **17**(4), 738–743 (1989)
15. Ismailova A.I., Gnezdilov O.I., Muranova L.N., Obynochny A.A., Andrianov V.V., Gainutdinov Kh.L., Nasyrova A.G., Nigmatullina R.R., Rakhmatullina F.F., Zefirov A.L.: Appl. Magn. Reson. **28**, 421–430 (2005)
16. Mazur M., Valko M., Klement R., Mirris H.: Analytica Chimica Acta **333**, 249–252 (1996)
17. Tseitlin M.P., Iyudin V.S., Tseitlin O.A.: Appl. Magn. Reson. **35**, 569–580 (2009)
18. Ингрэм Д.: Электронный парамагнитный резонанс в биологии. М.: Мир 1972. 297 с.
19. Andrianov V.V., Sitdikov F.G., Gainutdinov Kh.L., Yurtaeva S.V., Muranova L.N., Obynochny A.A., Karimov F.K., Chiglitsev V.M., Iyudin V.S.: J. Develop. Biol. **38**(6), 352–356 (2008)
20. Samdani A.F., Dawson T.M., Dawson V.L.: Stroke **28**, 1283–1288 (1997)
21. Manukhina E.B., Downey H.F., Mallet R.T.: Exp. Biol. Med. **231**, 343–365 (2006)



АСПИРАНТЫ И МОЛОДЫЕ УЧЁНЫЕ

Аспирантура

В 2008 году аспирантуру закончили 6 человек:

1. Галявиев Ильнар Гарафетдинович
2. Июдин Василий Сергеевич
3. Калашников Дмитрий Андреевич
4. Леонтьев Андрей Владимирович
5. Салихов Руслан Ильгизович
6. Суханов Андрей Анатольевич

В 2008 году в аспирантуру поступили 7 человек:

1. Бакиров Марсель Марсович
01.04.11 “Физика магнитных явлений”,
руководитель д.ф.-м.н. Воронкова В.К.
2. Конов Константин Борисович
01.04.11 “Физика магнитных явлений”,
руководитель д.ф.-м.н. Воронкова В.К.
3. Лебедев Денис Владимирович
01.04.17 “Химическая физика, в т.ч. физика
горения и взрыва”,
руководитель д.ф.-м.н. Бухараев А.А.
4. Лёксин Павел Владимирович
01.04.11 “Физика магнитных явлений”,
руководитель д.ф.-м.н. Гарифуллин И.А.
5. Халиков Руслан Альбертович
01.04.07 “Физика конденсированного состояния”,
руководитель д.ф.-м.н. Петухов В.Ю.
6. Шарипов Камилль Рашидович
01.04.11 “Физика магнитных явлений”,
руководитель к.ф.-м.н. Ерёмина Р.М.
7. Крылатых Наталья Алексеевна
01.04.11 “Физика магнитных явлений”,
руководитель к.ф.-м.н. Фаттахов Я.В.

На 31.12.09 число аспирантов института с очной формой обучения составило 21 человек (аспирантов заочного обучения нет).

В 2009 году соискателем стала:

- Фаттахова Юлия Зиннуровна
01.04.05 “Оптика”,
руководитель к.ф.-м.н. Калачёв А.А.

Премии и награждения

- Салихов Р.И., инженер II категории, награждён премией и дипломом за I-ое место в городском конкурсе среди молодых учёных и специалистов на соискание Казанской премии им. Е. К. Завойского в области физики.
- Халитов Н.И., лаборант, награждён дипломом Международного молодёжного научного форума “Ломоносов” за лучший доклад на секции “Физика”.
- Халитов Н.И., лаборант, награждён дипломом Федерального агентства по образованию как победитель I-го этапа Всероссийского конкурса научных работ студентов.
- Леонтьев А.В., м.н.с., стал лауреатом стипендии КФТИ им. Б. М. Козырева среди молодых учёных 2009 года.
- Конов А.Б. стал лауреатом стипендии КФТИ им. Н. С. Гарифьянова среди аспирантов 2009 года.

Победитель конкурса на соискание грантов Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских учёных – кандидатов наук

1. Петрушкин С.В., к.ф.-м.н.: Физические принципы и фундаментальные проблемы когерентного фемтосекундного лазерного охлаждения легированных наноструктур и полимерных плёнок (МК-6162.2008.2)
2. Арсланов Н.М., к.ф.-м.н.: Разработка нанооптической квантовой памяти и алгоритмов квантового процессинга на поверхностных поляритонах в метаматериалах (МК-4090.2009.2)
3. Зиганшина С.А., к.х.н.: Исследование электрокатализа на наночастицах металлов методами вольтамперометрии и сканирующей зондовой микроскопии (МК-2763.2009.3)

Победители республиканского конкурса на соискание грантов Академии наук Республики Татарстан для молодых учёных

1. Коновалов А.А., к.ф.-м.н.: Воздействие высокоэнергетического облучения на лазерные кристаллы форситерита для улучшения их генерационных свойств (№ 02-11/г-2009)
2. Хантимеров С.М., вед. инж.: Исследование сорбционных свойств углеродных наноструктурных материалов для решения проблемы эффективного хранения водорода (№ 09-2/г-2009)

Победитель Пятого республиканского конкурса “Пятьдесят лучших инновационных идей для Республики Татарстан” в номинации “Наноимпульс”

- Лебедев Д.В., аспирант: Новый тип зондов для исследования упругих свойств биологических объектов методом атомно-силовой микроскопии

Именная премия ОАО “Ак Барс” банка в рамках Пятого республиканского конкурса “Пятьдесят лучших инновационных идей для Республики Татарстан”

- Лебедев Д.В., аспирант: Новый тип зондов для исследования упругих свойств биологических объектов методом атомно-силовой микроскопии

Победители конкурса инновационной образовательной программы “Участник молодёжного научно-инновационного конкурса (“У.М.Н.И.К.”)”

1. Гаврилова Т.П., аспирантка: Исследование низкоразмерных кристаллических соединений, в которых наблюдается спин-пайерлсовский магнитный фазовый переход, для объяснения магнитной структуры соединений и поиск веществ с более высокой температурой перехода с целью возможного создания такого элемента квантовой электроники, как элементарная ячейка памяти (проект № 8513, тема № 3)

2. Латыпов И.З., аспирант: Исследование принципов релаксометрии и разработка способов измерения времени фазовой релаксации оптически прозрачных сред с использованием корреляционных свойств бифотонных полей (госконтракт № 6637р/8720, тема № 4)
3. Лебедев Д.В., аспирант: Разработка зондов с микрошариком на конце кантилевера и исследование упругих свойств биологических объектов с помощью атомно-силовой микроскопии (проект № 8697, тема № 6)
4. Хантимеров С.М., вед. инж.: Разработка методики электрохимического заполнения углеродных нанотрубок водородом (госконтракт № 6637р/8720, тема № 24)
5. Чулкинов А.П., н.с.: Разработка компьютерного алгоритма для сегментации атомно-силовых изображений сгруппированных наночастиц, сформированных на поверхности с неровностями (проект № 8697, тема № 7)

Победители конкурса для молодых учёных и аспирантов “Гранты КФТИ”

1. Гатиятов Р.Г.: Изучение влияния тока высокой плотности на магнитные свойства нанобъектов
2. Иванин К.В.: Исследование полупроводниковой гетероструктуры GaAs/AlGaAs методом фемтосекундного фотонного эха
3. Панарина Н.Ю.: Исследование критических свойств нового класса сверхпроводников на основе пниктида железа
4. Шмелёв А.Г.: Новые методы исследования молекулярной динамики жидкостей

Максут Мухамедзянович Зарипов. К 80-летию со дня рождения

В сентябре 2009 года исполнилось 80 лет Максуту Мухамедзяновичу Зарипову – известному физику, учёному и педагогу, крупному организатору науки, признанному специалисту в области ЭПР в кристаллах. Выпускник физико-математического факультета Казанского государственного университета 1952 года, в 1955 году он защитил кандидатскую диссертацию “К теории тонкой и сверхтонкой структуры спектров парамагнитного резонанса”, выполненную под руководством проф. С. А. Альтшулера. В диссертации были заложены основы теории магнитного резонанса в специальном классе веществ, впоследствии получивших название ван-флековских парамагнетиков. В последующие годы в Казанском университете и ряде зарубежных научных центров были проведены детальные исследования этих веществ, выявлен целый ряд их особенностей и возможностей практического использования. За эти работы М. М. Зарипов в составе группы исследователей был удостоен Государственной премии Республики Татарстан 2006 года.

Начало самостоятельной научной деятельности Зарипова совпало с периодом становления казанской школы магнитного резонанса, основателями которой были академик Е. К. Завойский и профессора С. А. Альтшулер и Б. М. Козырев, и М. М. Зарипов принял активное участие в этом процессе. Он возглавил группу физиков-экспериментаторов, начавших систематические исследования спектров ЭПР в кристаллах, в том числе минерального происхождения, содержащих парамагнитные ионы группы железа. Результатом этих исследований явилось установление общих закономерностей взаимодействия парамагнитного иона с кристаллической решёткой, а также широкое внедрение методов магнитного резонанса в кристаллохимию и геохимию. Целый ряд исследованных кристаллов в дальнейшем получил применение в качестве рабочих веществ для квантовых генераторов и усилителей. Особо отметим первое наблюдение и интер-



Максут Мухамедзянович Зарипов

претацию тонкой структуры спектра ЭПР ионов хрома в кристалле рубина (1956 г.), на основе которого были созданы первые лазеры.

В 1963 году М. М. Зарипов возглавил кафедру квантовой электроники и радиоспектроскопии в Казанском государственном университете, созданную в том же году. В течение более 40 лет он читает ключевой курс лекций “Основы теории спектров электронного парамагнитного резонанса”. В 2009 году в издательстве Казанского университета напечатана книга М. М. Зарипова, содержащая вышеназванный курс лекций для студентов, магистрантов и аспирантов, исследующих ЭПР в твёрдых телах.

В 1966 году он защищает докторскую диссертацию “Исследование спектров ЭПР в кристаллах”. В 1968–1971 гг. он – декан физического факультета, а в 1971 году, не прекращая чтения лекций в университете, становится заведующим лабораторией физики твёрдого тела в Казанском физико-техническом институте (КФТИ) Казанского филиала Академии наук СССР. В период с 1972 по 1988 гг. М. М. Зарипов – директор КФТИ, при этом в 1972–1982 гг. он – председатель Президиума Казанского филиала АН СССР.

Вместе с сотрудниками возглавляемой им лаборатории М. М. Зарипов открыл эффект рекристаллизации поверхностного слоя имплантированного полупроводника под действием мощного лазерного облучения (“лазерный отжиг”, 1973 г.), ныне используемый в технологии изготовления полупроводниковых приборов. За эти работы он вместе с коллективом соавторов был удостоен в 1988 году Государственной премии СССР в области науки и техники.

Итогом научной деятельности М. М. Зарипова к настоящему времени являются свыше двухсот опубликованных работ. Из его учеников тридцать один защитил кандидатские диссертации, кроме того он подготовил одиннадцать докторов наук. В настоящее время М. М. Зарипов – главный научный сотрудник лаборатории радиоспектроскопии диэлектриков КФТИ и профессор кафедры квантовой электроники и радиоспектроскопии Казанского

государственного университета. М. М. Зарипов является член-корреспондентом Академии наук Республики Татарстан с момента её создания в 1992 году и принимает активное участие в работе Академии, является членом научного совета Академии наук РТ по физике. Достижения проф. М. М. Зарипова отмечены государственными наградами. Максуд Мухамедзянович награждён орденом Трудового Красного Знамени, почётными грамотами и медалями, ему присвоены почётные звания: “Заслуженный деятель науки Татарской АССР” и “Заслуженный деятель науки Российской Федерации”.

Мы искренне желаем Максуду Мухамедзяновичу здоровья, новых творческих достижений.

*Л. К. Аминов,
К. М. Салихов,
М. С. Тагиров*

Минрахман Абдрахманович Файзуллин. К 80-летию со дня рождения

В январе 2009 года исполнилось 80 лет со дня рождения Минрахмана Абдрахмановича Файзуллина, старейшего сотрудника нашего института, токаря высшей квалификации.

Минрахман Абдрахманович родился 14 января 1929 года в ст. Хонжонково Донецкой области, в семье шахтёра. Накануне войны семья переехала в Казань, и Минрахман продолжил своё образование в школе № 33. С 18 марта 1943 года началась его трудовая деятельность. Четырнадцатилетний подросток был принят учеником токаря в мастерскую при Казанском авиационном институте. В годы войны многие предприятия выпускали военную продукцию. В мастерской при вузе точили корпуса для снарядов, готовили байки для бомб и др. До конца войны и Минрахман работал вместе со всеми, помогая фронту.

В 1949 году М. Файзуллин был призван в ряды Советской армии и до 1954 года служил на Тихом океане, стойко перенося все тяготы суровой морской службы. Демобилизовался он мотористом-старшиной второй статьи.

В последующие годы М. А. Файзуллин работал токарем на ряде казанских предприятий, в том числе на Казанском механическом заводе, в ГНИТИ-ВТ, СКПБ “Нефтехимпромавтоматики” и др., совершенствуя своё токарное мастерство, повышая профессиональную квалификацию.



Минрахман Абдрахманович Файзуллин

С 1965 по 1975 гг. он работал токарем 6, затем 7 разрядов в Институте органической и физической химии им. А. Е. Арбузова КФ АН СССР.

В 1976 году М. А. Файзуллин по приглашению Э. Г. Харахашьяна перешёл в Казанский физико-технический институт, где трудится и по сей день. Он является одним из старейших и самых уважаемых сотрудников нашего института. Изготовленные им детали работают практически во всех экспериментальных установках, созданных в институте. Его работу всегда отличают высокое качество, быстрота, точность, что означает высокий профессионализм. Минрахман Абдрахманович равнодушен к своей работе, он вкладывает в работу часть своей души. Поэтому он часто даёт сотрудникам института полезные советы, помогающие улучшить конструкцию создаваемых или модернизируе-

мых экспериментальных установок, быстрее получить экспериментальные результаты.

Честный и добросовестный труд М. А. Файзуллина неоднократно поощрялся. Трижды он награждался почётными грамотами Президиума АН СССР (РАН). В 1983 году был премирован за лучшую работу года и за выполнение тематических исследований АН СССР. Минрахман Абдрахманович является лауреатом “Диплома КФТИ” и премии им. М. Л. Блатта 2002 года. Его многолетний труд отмечен Благодарственным письмом Президента РТ М. Ш. Шаймиева.

Как труженик тыла, М. А. Файзуллин отмечен правительственными наградами.

Редко можно встретить людей, чей трудовой стаж превышает 60 лет!

От всей души поздравляем Минрахмана Абдрахмановича с юбилеем! И в преддверии 65-летия Победы в Великой отечественной войне желаем ему крепкого здоровья, бодрости духа и творческой смекалки на долгие годы!

Н. А. Карташёва, Е. Ф. Куковицкий,
Ю. И. Таланов, В. Ф. Тарасов,
И. А. Файзрахманов

Самарцев Виталий Владимирович. К 70-летию со дня рождения

*Каждый выдающийся исследователь
вносит своё имя в историю науки
не только собственными открытиями,
но и теми открытиями, к которым он
побуждает других.*

Макс Планк

В этом году исполнилось 70 лет нашему многоуважаемому коллеге, известному российскому учёному, человеку высокой культуры и самых разнообразных интересов и знаний – Виталию Владимировичу Самарцеву. Его биография может служить примером исключительной преданности науке, удивительной работоспособности, настойчивости и энтузиазма в достижении поставленных целей.

Виталий Владимирович родился 29 октября 1939 года в Казани. Ему было всего девять лет, когда умер его отец – Самарцев Владимир Петрович, фронтовик, участник советско-финской войны, и его воспитала мать – Фазлуллина Асия Ашрафьяновна. Работник культуры, яркая и энергичная женщина, она привила сыну любовь к прекрасному и поощряла его стремление к образованию, проявившееся с юных лет. Но для него, как и для многих в его послевоенном поколении, путь от школьной скамьи в аудитории университета был непрост.

В 1954 году Виталий Владимирович поступил на дневное отделение Казанского авиационного техникума, который успешно окончил в 1958 году по специальности “техник-механик по авиадвигателям” и проработал несколько месяцев в качестве моториста 5 разряда. Затем, в ноябре 1958 года, В. В. Самарцев был при-



Самарцев Виталий Владимирович

зван в ряды Советской армии, где он закончил школу младших авиационных специалистов и служил в войсках воздушно-десантного обеспечения в г. Белогорске Амурской области до мая 1960 года. В 1960–1962 гг. Виталий Владимирович работал на одном из казанских предприятий инженером-конструктором и одновременно учился на вечернем отделении Казанского авиационного института (КАИ) по специальности “технология машиностроения”. Затем в 1962–1963 гг. он работал сначала инженером, затем – старшим инженером в Казанском научно-исследовательском институте экспериментально-хирургической аппаратуры и инструментов. К этому моменту сформировался его интерес к фундаментальной физике, и в 1963 году В. В. Самарцев перевёлся с вечернего отделения КАИ на дневное отделение физического факультета Казанского государственного университета (КГУ), который окончил с отличием в 1966 году по

специальности “Физик. Теория относительности и гравитации” и был направлен в аспирантуру КФТИ АН СССР. В октябре 1969 года В. В. Самарцев окончил аспирантуру с представлением кандидатской диссертации по тематике фотонного эха в газах и жидкостях, которую он успешно защитил в марте 1970 года. Молодой талантливый учёный был приглашён на работу в отдел квантовой акустики КФТИ АН СССР на должность младшего научного сотрудника. Но уже спустя три года ему предлагают возглавить группу светового эха и избирают на должность старшего научного сотрудника, на которой он проработал до ноября 1986 года.

В 1981 году Виталий Владимирович успешно защитил в ИФ БССР (Минск) докторскую диссертацию по специальности “оптика” по базовым проблемам оптической эхо-спектроскопии. В 1986–1993 гг. он работал в КФТИ КФ АН СССР (позднее – КазНЦ РАН) на должности главного научного сотрудника, а в конце 1993 года В. В. Самарцев был избран заведующим лабораторией нелинейной оптики института, которую он продолжает возглавлять до настоящего времени.

Одновременно, с 1986 года Виталий Владимирович активно ведёт педагогическую работу: в 1986–1990 гг. – в Казанском химико-технологическом институте, а затем – с 1990 года по настоящее время – на физическом факультете КГУ, где читает различные спецкурсы лекций по проблемам когерентной оптики, оптической обработки информации и лазерной спектроскопии. В 1990 году ему было присвоено учёное звание “профессор” по специальности “оптика”. Он подготовил семь докторов и около 30 кандидатов наук. Не будет преувеличением сказать, что во многом благодаря его усилиям в Казани возникла научная школа, формирующая высококвалифицированных специалистов в области нелинейной и когерентной оптики, заслуженно пользующаяся высокой репутацией в российском и мировом научном сообществах.

За более чем сорокалетний период творческой деятельности проф. В. В. Самарцевым с коллегами опубликовано более 400 научных статей, 12 книг (две из которых переведены на английский язык и изданы за рубежом), три коллективные монографии; осуществлён перевод с английского на русский язык четырёх зарубежных книг по различным проблемам квантовой оптики, квантовых вычислений и нанооптики.

Виталий Владимирович Самарцев – организатор и бессменный председатель оргкомитетов девяти международных симпозиумов по фотонному эху и когерентной спектроскопии и десяти международных чтений по квантовой оптике. Кроме того, с 1997 года он является проректором ежегодных молодёжных научных школ по когерентной оптике и оптической спектроскопии, проводимых в Казани совместно КФТИ КазНЦ РАН и КГУ.

Его научная и организационная деятельность отмечена присуждением ему в 1996 году почётного звания “Заслуженный деятель науки Республики Татарстан”, а

в 2001 году – “Заслуженный деятель науки Российской Федерации”.

Проф. В. В. Самарцев – заместитель председателя специализированного Совета по защите докторских и кандидатских диссертаций по специальности “Оптика” на физическом факультете КГУ. Будучи в течение многих лет по совместительству профессором кафедры оптики и нанофотоники, он вместе с проф. М. Х. Салаховым возглавил созданную в июне 2006 года совместную (КГУ и КФТИ КазНЦ РАН) лабораторию когерентной оптики и оптической спектроскопии.

Проф. В. В. Самарцев с 1990 года – член редколлегии международного научного журнала “Laser Physics” и действительный член Всероссийского оптического общества. В 1998 году за лучшую публикацию в области лазерной физики ему была присуждена премия МАИК “Наука”. В 1996 году Виталий Владимирович был избран членом-корреспондентом РАЕН, а в 2004 году – действительным членом этой академии по секции физики и механики. Он является членом Научного совета РАН “Спектроскопия атомов и молекул”. В 2009 году за цикл научных работ “Когерентные и коллективные явления в нелинейной и квантовой оптике”, включающий в себя четыре монографии и 40 оригинальных научных статей, ему была присуждена Государственная премия Республики Татарстан в области науки и техники.

Поздравляя Виталия Владимировича с 70-летним юбилеем и отмечая полноту его творческих сил, мы желаем ему здоровья и неистребимого оптимизма на долгие годы!

*Д. Д. Власова, И. В. Евсеев,
Н. В. Знаменский, В. А. Зуйков,
А. А. Калачёв, А. А. Калинин,
К. Р. Каримуллин, И. З. Латыпов,
В. Н. Лисин, Т. Г. Митрофанова,
А. В. Наумов, С. В. Петрушкин,
Е. А. Попов, И. И. Попов,
В. С. Романов, Ю. З. Фаттахова,
Р. Н. Шахмуратов, А. М. Шегада,
А. В. Шкаликов*

Памяти Михаила Львовича Блатта. К 100-летию со дня рождения

15 ноября 2009 года исполнилось 100 лет со дня рождения Михаила Львовича Блатта.

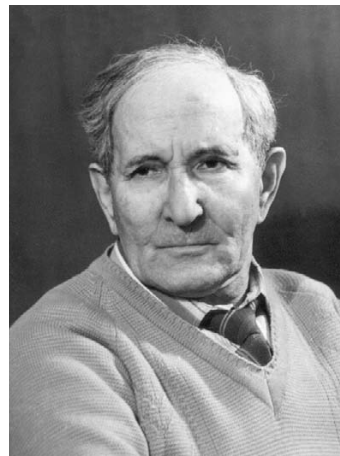
Михаил Львович работал в нашем институте с 6 сентября 1950 года до дня своей смерти – 3 ноября 1996 года. Он запомнился всем сотрудникам, как яркая, творческая личность.

Его долгая, насыщенная событиями, жизнь вместила несколько разных периодов истории нашей страны. Родился Михаил Львович в Воронеже в 1909 году в семье портного, когда российское государство было ещё монархическим. Когда он учился в школе, произошло свержение царя (февраль 1917 года), а затем – Октябрьская революция, установление власти большевиков и социалистического строя (ноябрь 1917 года), гражданская война. Его молодость проходила в период становления советского государства и годы первых пятилеток.

В 1928 году М. Л. Блатт закончил обучение в Художественном техникуме, параллельно с учёбой он работал в Воронежской студии “Союзкинохроника”. Однако найти желанную работу, связанную с фотографией или кинематографом, тогда (и долгое время после) не удалось. Приходилось добывать средства для своего существования и содержания семьи (в 1932 году Михаил Львович женился), работая мастером по выделке кожи и шорником в артели “Своя сила”, позднее – токарем на машиностроительном заводе им. Коминтерна. В 1934 году он окончил Индустриально-механический техникум, и с этого момента начался большой период его преподавательской деятельности. Он обучал черчению и техническим дисциплинам слушателей курсов мастеров социалистического труда и учеников школы ФЗУ (фабрично-заводского ученичества) при Воронежском авиационном заводе.

В 1941 году, когда началась война, завод и школа были эвакуированы в Казань. Михаил Львович вместе со своей, ставшей уже большой семьёй (у него родились три сына), переехал в Казань, где и прожил все оставшиеся годы своей долгой жизни. Здесь он продолжал педагогическую деятельность. Вместе с тем, он не оставлял усилий по самостоятельному изучению техники и искусства фотографии (у него была большая библиотека книг на эту тему), не переставал искать возможности приложения своих знаний и опыта в этом деле. Наконец его мечта сбылась. В сентябре 1950 года он приступил к работе в Физико-техническом институте и Казанском филиале Академии наук (КФ АН) СССР в качестве заведующего фотолабораторией.

Долгие годы Михаил Львович был самым нужным и незаменимым сотрудником института. Он изготавливал схемы, графики, фотографии и другие иллюстрации для



Михаил Львович Блатт
(15.11.1909–3.11.1996)

всех (!) статей, книг и диссертаций, выходивших из-под пера всех (!) сотрудников нашего института. К нему за помощью обращались и химики, и биологи, и геологи, и медики. Михаил Львович никому не отказывал, помогал всем, хотя и ворчал при этом, ругался и заставлял аккуратно и тщательно готовить материалы для фотокопирования, учил, как это делать. Рутинная работа. Но он, как творческий человек, даже к такой рутине относился, как к искусству, не позволял ни себе, ни другим делать что-то плохо, спуская рукава. Бывали моменты, когда ему требовалось проявить всё своё умение и недюжинную смекалку, чтобы выполнить сложную работу. Например, когда потребовалось изготовить двухметровый портрет И. В. Сталина для размещения на фасаде здания КФ АН по случаю какого-то большого праздника. Подвесив фотоувеличитель (теперь не все уже знают, что это такое) под потолком в туалете, он проецировал изображение на огромный лист фотобумаги, изготовленный по его заказу на Казанском заводе фотоматериалов (ныне – “Тасма”). Затем проявлял изображение, ведрами выливая проявитель на фотобумагу! Затем – промывка водой и фиксаж, опять же ведрами. И снова промывка. И всё это – почти в полной темноте, при свете тусклого красного фонаря ... Портрет получился на славу.

Проявить в полной мере свои творческие способности Михаил Львович мог, выполняя художественные работы по заказу журналов и театров. Он делал фотографии (в том числе, и на обложки) для “Театральной жизни”, “Азат хатын”, “Ялкын” и других журналов. С 1965 года Михаил Львович – член Союза журналистов СССР. Ему приходилось совершать по заданию республиканского правительства сложные путешествия в дальние районы Татарстана для фотосъёмки гидроэлектростанций, возведённых на малых реках.

Михаил Львович был хорошо знаком с акад. А. Е. Арбузовым, обучал его технике фотографии. В характеристике, написанной Александром Ерминингельдовичем (в то время – председателем Президиума КФАН) в апреле 1951

года, он, в частности, дал такую оценку: “М. Л. Блатт добросовестный, честный и аккуратный работник. Наряду с выполнением текущей работы, систематически занимается повышением своей квалификации и изыскивает новые, оригинальные методы фотопроекции. Проявляет большой интерес и оказывает помощь научным сотрудникам при выполнении тем путём выполнения фотосъёмок объектов научного исследования и систематических консультаций. Занимаемой должности вполне соответствует”.

За 46 лет своей работы в КФТИ Михаил Львович не дал ни одного повода усомниться в этих словах. Более того, его авторитет и уважение к нему сотрудников только росли год от года. Он был при жизни и остаётся по сей день для многих примером ответственного, неформального и творческого отношения к своему делу. Не случайно после смерти Михаила Львовича была учреждена премия его имени. По решению Учёного совета КФТИ от 26 апреля 2000 года премия имени

М. Л. Блатта в ноябре каждого года вручается одному из сотрудников вспомогательных подразделений института. Идея премии заключается в том, что посредством её научные сотрудники выражают свою признательность и уважение тем сотрудникам ненаучных подразделений, которые многолетним и добросовестным трудом, неформальным подходом к своему делу снискали доброе отношение к себе.

Уже нет в институте фотолаборатории, первым, единственным и бессменным заведующим которой в течение 46 лет оставался Михаил Львович Блатт. Она не выдержала конкуренции с компьютерами и современными технологиями. А может быть, она просто не могла существовать без Михаила Львовича. Но остались его фотографии (они есть во всех ежегодниках КФТИ). Осталась память о нём. Только добрая.

Ю. И. Таланов

Памяти Дмитрия Яковлевича Осокина

20 декабря 2009 года ушёл из жизни Дмитрий Яковлевич Осокин – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории спиновой физики и спиновой химии КФТИ КазНЦ РАН. Физтех будет помнить Дмитрия Яковлевича как специалиста высокого уровня в области ядерного квадрупольного резонанса (ЯКР), талантливого экспериментатора и интеллигентного человека.

С 1965 года и до последнего дня трудовая деятельность Д. Я. Осокина была связана с физтехом. Здесь он был и аспирантом, и руководителем лаборатории ядерного магнетизма, долгие годы был авторитетным членом Учёного совета и заместителем председателя Совета по защите докторских и кандидатских диссертаций КФТИ КазНЦ РАН. В институт он пришёл, имея после окончания Казанского авиационного института по специальности “конструирование и производство радиоаппаратуры” опыт работы на Казанском заводе “Электрон”. Его учителями стали Б. М. Козырев и И. А. Сафин. Совместно с И. А. Сафиным Дмитрий Яковлевич разработал и изготовил первый в мире когерентный спектрометр ЯКР, пригодный как для поиска частот ЯКР, так и для релаксационных измерений. Разработанная аппаратура превосходила по своим параметрам аналогичные приборы, имеющиеся в то время в мире.

В дальнейшем Дмитрий Яковлевич разработал и создал новый когерентный фазорегулируемый ЯКР-спектрометр, позволяющий создавать практически лю-



Дмитрий Яковлевич Осокин
(3.11.1937–20.12.2009)

бые циклические импульсные программы. В это время Д. Я. Осокиным выполнены работы по спиновой динамике в соединениях азота, которые часто цитируются в научной литературе во всём мире. В этих работах с особой яркостью проявился и талант экспериментатора, и глубокое теоретическое осмысление полученных результатов. Впоследствии на основе функциональной схемы фазорегулируемого спектрометра ЯКР, созданного Д. Я. Осокиным, фирма Apollo (США) совместно с Технологическим институтом (Gebze Institute of Technology (GYTE)) (Турция), изготовили двухчастотный спектрометр ЯКР.

В 1984 году Дмитрий Яковлевич блестяще защитил докторскую диссертацию по теме “Импульсная спектроскопия ядерного квадрупольного резонанса ^{14}N ”.

Д. Я. Осокин разработал метод записи слабых сигналов ЯКР с помощью многоимпульсных последовательностей, который защищён авторским свидетельством. Д. Я. Осокиным и одновременно с ним проф. Р. Марино из Нью-Йоркского университета впервые экспериментально зарегистрирована стационарная поперечная намагниченность ЯКР, незатухающая в течение неограниченного промежутка времени в режиме многоимпульсной спектроскопии. Эта методика позволила на один-два порядка поднять чувствительность ЯКР-спектрометров и послужила фундаментальной базой для разработки аппаратуры для дистанционного обнаружения взрывчатых веществ и наркотиков.

Д. Я. Осокин участвовал в разработке выпускаемого Казанским физико-техническим институтом медицинского магнитно-резонансного томографа.

Накопленный экспериментальный материал по исследованию ЯКР азота был обобщён в монографии И. А. Сафина и Д. Я. Осокина “Ядерный квадрупольный резонанс в соединениях азота” (М.: Наука 1977). Дмитрий Яковлевич был одним из переводчиков книги Р. Эрнста, Дж. Боденхаузена и А. Вокауна “ЯМР в одном и двух измерениях” (Салихов К.М., ред. М.: Мир 1987).

Дмитрий Яковлевич щедро передавал свой богатый опыт ученикам. Под его руководством защищено не-

сколько кандидатских диссертаций. Среди его учеников В. А. Шагалов, Р. Х. Курбанов, В. Л. Ермаков, О. Д. Фоминых, Л. Е. Матухина и Р. Р. Хуснутдинов.

В 2009 году им был получен патент на изобретение “Устройство формирования оптимального угла отсечки в выходных каскадах усилителей мощности”.

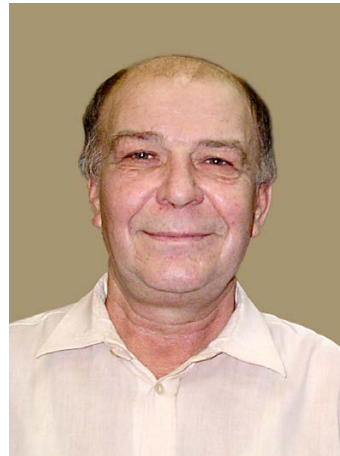
Дмитрия Яковлевича Осокина всегда отличало богатство идей, стремление сделать что-то новое и оригинальное, и обязательно на мировом уровне. Сочетание высокого профессионализма в создании новой аппаратуры и ясного понимания современных математических методов магнитного резонанса позволило ему сделать пионерские работы в ЯКР, ставшие классикой. В отношениях с коллегами Дмитрий Яковлевич был глубоко порядочен, скромнен, безупречно честен и обязателен. Он был разносторонне одарённой личностью: увлекался поэзией, музыкой, живописью, сам прекрасно рисовал.

Сотрудники института глубоко скорбят о кончине Дмитрия Яковлевича Осокина и выражают искреннее соболезнование его родным и близким.

*А. И. Андреева, В. Л. Ермаков,
В. Л. Матухин, И. В. Овчинников
В. А. Шагалов*

Памяти Юрия Серафимовича Грезнева

В ноябре 2009 года институт простился с научным сотрудником лаборатории физики перспективных материалов, кандидатом физико-математических наук Юрием Серафимовичем Грезневым. Ушёл из жизни яркий, неординарный человек, оказавший большое влияние на множество людей, соприкасавшихся с ним в разные периоды его жизни. Юрий Серафимович окончил физический факультет Казанского государственного университета (КГУ) по специальности “радиофизика и электроника” в 1965 году. В том же году поступил в аспирантуру по кафедре радиоспектроскопии КГУ, где его руководителем стал тогда ещё молодой профессор Максут Мухамедзянович Зарипов. Сразу же Ю. С. Грезнев был призван в ряды Советской армии и приступил к учёбе в аспирантуре только в 1967 году. Учёба в аспирантуре прерывалась ещё раз на несколько лет, в течение которых он работал старшим лаборантом проблемной лаборатории магнитной радиоспектроскопии физфака КГУ. В 1974 году Ю. С. Грезнев окончил аспирантуру с защитой кандидатской диссертации. В диссертации были обобщены результаты его пионерских ЭПР-исследований



Юрий Серафимович Грезнев
(28.10.1943–13.11.2009)

ионов группы железа в низкосимметричных кристаллах при наличии нескольких магнитно неэквивалентных или разных по своим магнитным свойствам ионов.

В том же 1974 году Ю. С. Грезнев был принят по распределению в лабораторию физики металлов Казанского физико-технического института КФ АН СССР на должность младшего научного сотрудника. В начале работы в КФТИ Юрию Серафимовичу было поручено заниматься разработкой методов неразрушающего контроля качества

металлических деталей автомобиля для завода КамАЗ. При его участии были созданы, защищены авторскими свидетельствами и внедрены в производство измеритель глубины закалённого слоя готовой детали “распредвал” и микротвёрдомер для определения твёрдости рабочих поверхностей детали “коленчатый вал”. В этот период он много занимался научно-организационной деятельностью: исполнял обязанности заместителя заведующего лабораторией физики металлов, когда ею заведовали Э. Г. Харахашьян и И. А. Гарифуллин. Позже Юрий Серафимович принял участие в исследованиях высокотемпературных сверхпроводников. Так при исследовании ЭПР на магнитных зондах гадолиния в керамике LaSrCuO было показано, что сверхпроводящее спаривание в этой системе может быть описано с помощью модифицированной модели Бардина-Купера-Шриффера. Он активно участвовал в исследовании методом ЭПР динамики фазовых переходов в сегнетоэлектриках с несоразмерной фазой.

Юрий Серафимович был активным членом коллектива КФТИ: избирался в профком, участвуя в организации культурной и спортивной жизни института, редактировал стенную газету “Наука”. В любом заинтересовавшем его деле Юрий Серафимович обладал даром притягивать к себе людей. Вокруг него создавалась атмосфера увлечённости, сопричастности к коллективному творчест-

ву. Значительное место в жизни Юрия Серафимовича занимала песня, он умел и любил петь. Многолетний староста знаменитой хоровой капеллы Казанского государственного университета, Юрий Серафимович был одновременно и её неформальным лидером, объединявшим множество студентов, сотрудников и выпускников университета разных возрастов. Он был разносторонне талантливым и очень увлекающимся человеком. Не счесть защитившихся кандидатов и докторов разных наук, к оформлению плакатов которых приложил дружескую руку художника Юрий Серафимович в те не столь давние времена, когда плакаты и графики к защитах рисовались и писались рейсфедером, тушью и плакатным пером. И каждый раз процесс создания плакатов с участием Юрия Серафимовича был сродни искусству и часто заминался защищавшимся больше, чем сама защита. Он был великолепным педагогом, умеющим заинтересовать физикой молодых людей. Пешком с рюкзаком за плечами, на байдарке, на мотоцикле Юрий Серафимович прошёл многими красивыми местами Советского Союза, и те, с кем рядом он был в пути, всегда сохраняли тёплые чувства от общения с ним. Он был надёжнейшим другом, готовым прийти на помощь, даже в ущерб себе. И у всех друзей Юры в душе звучит его голос: “Милая, ты услышь меня, под окном стою я с гитарой ...”

Н. К. Соловаров

НАУЧНО-ОРГАНИЗАЦИОННАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ

Выездная сессия Научного совета по физике конденсированных сред в Казани

В 2009 году выездная сессия Научного совета по физике конденсированных сред состоялась на базе Учреждения Российской академии наук Казанского физико-технического института им. Е. К. Завойского Казанского научного центра РАН. Программа и организационные вопросы по проведению этой сессии были решены быстро и чётко, и в этом, несомненно, заслуга Ирины Николаевны Чугуевой. Сессия проходила с 15 по 17 июня. В Казань для участия в работе сессии приехала очень представительная делегация во главе с председателем Научного совета член.-корр. РАН Виталием Владимировичем Кведером и его заместителями – Ириной Николаевной Чугуевой и Александром Алексеевичем Левченко. Приехали члены совета из институтов Москвы, Черноголовки, Санкт-Петербурга, Екатеринбурга, Астрахани, Ростова-на-Дону и Махачкалы. Активное участие в работе сессии приняли и казанские учёные, сотрудники КФТИ КазНЦ РАН и КГУ. Сессия открылась 15 июня в актовом зале Казанского научного центра очень интересным докладом В. В. Кведера “Инженерия дефектов для кремниевых солнечных элементов”. Надо сразу отметить, что все представленные на сессии доклады вызвали большой интерес у слушателей и активное обсуждение, которое продолжалась в перерывах и после окончания заседаний в неформальной обстановке. Всего было заслушано и обсуждено 23 обзорных доклада, которые охватили все основные аспекты физики конденсированных сред. Участники сессии познакомились с исследованиями, проводимыми в КФТИ КазНЦ РАН, и посетили Казанский государственный университет. Так как выездная сессия проходила в разгар лета, одно из заседаний провели на берегу Волги. Сотрудники КФТИ КазНЦ РАН организовали выезд на базу отдыха “Голубой залив”. Заседание прошло прекрасно, чему способствовала солнечная погода, необыкновенная уха, приготовленная из рыбы, которую заботливо наловил В. Ю. Петухов; шашлыки, которые жарили под непосредственным руководством А. К. Муртазаева из Махачкалы. Чтобы обеспечить достойный отдых и высокий уровень научных дискуссий,

на базу выехала бригада молодых учёных, которыми руководила В. М. Голенева. Но главное – это, конечно, дружелюбная атмосфера, которая царила все дни работы выездной сессии.

Участники выездной сессии отметили высокий уровень результатов научных исследований, представленных на заседаниях в Казани. В решении, которое было принято на последнем заседании выездной сессии, было записано: “В частности, среди результатов, полученных в КФТИ КазНЦ РАН, особый интерес вызвали оригинальные результаты, представленные в докладах П. В. Лёксина “Триплетная сверхпроводимость в тонкоплёночных гетероструктурах сверхпроводник/ферромагнетик”, Р. М. Баязитова “Импульсная тонкоплёночная модификация полупроводниковых структур” и Р. Ф. Мамина “Уникальные магнитоэлектрические свойства и локально-индуцированные полярные состояния в манганитах”. На участников сессии большое впечатление произвела доброжелательная творческая атмосфера в



Академик Ю. А. Изюмов (ИФМ УрО РАН, Екатеринбург) делает доклад на тему: “Новый класс ВТСП в FeAs-соединениях”.



Обсуждение планов и программы. Слева направо: В. Ф. Тарасов (КФТИ КазНЦ РАН, Казань), И. Н. Чугуева и М. И. Карпов (ИФТТ РАН, Черноголовка).



Дискуссия в перерыве. Слева направо: А. А. Левченко, В. Е. Антонов и В. В. Кведер (ИФТТ РАН, Черноголовка).

научном коллективе института, высокий уровень проводимых в нём исследований и хорошее оснащение научным оборудованием КФТИ КазНЦ РАН, в особенности, наличие очень хорошего парка приборов для ЭПР- и

ЯМР-исследований, которые позволяют проводить в институте все виды магниторезонансных исследований на уровне лучших мировых стандартов”.

В. К. Воронкова

О работе Учёного совета КФТИ КазНЦ РАН

В 2009 году состоялось 36 заседаний Учёного совета. Заседания Учёного совета начались с обсуждения материалов докторских диссертаций: на первом заседании докторскую диссертацию представил А. Л. Степанов, а на третьем – Р. Н. Шахмуратов, оба они успешно защитили диссертации в 2009 году. Кроме докторских диссертаций, Учёный совет обсудил и рекомендовал к защите шесть кандидатских диссертаций. Учёный совет института ежегодно присуждает на конкурсной основе гранты для молодых учёных и аспирантов и именные стипендии. В 2009 году Учёный совет присудил А. В. Леонтьеву стипендию имени Б. М. Козырева, а лауреатом стипендии имени Н. С. Гарифьянова стал аспирант А. Б. Конов.

На научных сессиях Учёного совета заслушивались доклады сотрудников по статьям, подготовленным к публикации; доклады сотрудников при выдвижении на должность старшего научного сотрудника; выступления молодых учёных и аспирантов, участвующих в конкурсе на гранты для молодых учёных и аспирантов, учрежденные Учёным советом КФТИ; отчёты о длительных зарубежных командировках, а также просто интересные научные сообщения, представленные как сотрудниками, так и гостями института. В феврале 2009 года гостем института был проф. М. И. Куркин (Институт физики металлов УрО РАН, г. Екатеринбург), который сделал

доклад на тему: “Фемтосекундная магнитооптика: эксперимент и проблемы теории”. С большим интересом обсуждались также доклады В. Л. Миронова (Институт физики микроструктур РАН, г. Нижний Новгород) “Сканирующая зондовая микроскопия твёрдотельных наноструктур” и Р. И. Машковцева (Институт минералогии и петрографии СО РАН, г. Новосибирск) “Структура и электронное состояние собственных дефектов и примесей в кристаллах кварца, берилла и КТА по данным ЭПР и оптической спектроскопии”, сделанные по материалам докторских диссертаций. Нельзя не отметить и научный доклад проф. КГУ Л. Р. Тагирова “Управление сверхпроводящей волновой функцией с помощью магнетизма: от необыкновенных физических эффектов к устройствам криогенной спинтроники”, но мы не считаем его гостем, так как он активно сотрудничает с нашим институтом и работает в КФТИ по совместительству.

Ежегодно Учёный совет рассматривает и утверждает темы и планы работ аспирантов, планы научных работ института и отчёты заведующих лабораторий за год. В 2009 году на заседании Учёного совета были утверждены новые темы исследований института, финансируемые из бюджета РАН. В 2007–2009 гг. институт проводил исследования по 13 темам, при обсуждении планов исследований на 2010–2012 гг. были утверждены семь тем.

В связи с истечением срока избрания К. М. Салихова на должность директора института, на заседании Учёного совета восьмого апреля 2009 года кандидатура К. М. Салихова была вновь выдвинута для избрания его на новый срок. При выдвижении кандидатуры К. М. Салихова отмечался его высокий научный авторитет в России и за рубежом, колоссальная работоспособность, умение ставить высокие задачи и решать их. В самые трудные времена Кев Минуллинович смог организовать и поддержать инновационную деятельность, связанную с выпуском медицинского томографа. После избрания К. М. Салихова на должность директора, в соответствии с Уставом института были проведены выборы нового состава Учёного совета. Выборы Учёного совета прошли в конце октября, а новый состав был утверждён на заседании Бюро Отделения физических наук РАН 12 ноября 2009 года (протокол № 9) и он приступил к работе только 9 декабря 2009 года, так что практически до конца года Учёный совет работал в старом составе.

На заседании Учёного совета 10 июня было принято решение о создании Научно-образовательного центра КФТИ КазНЦ РАН “Спиновая физика, спиновая химия и спиновые технологии”.

На заседаниях Учёного совета рассматривался вопрос о выдвижении молодых кандидатов на соискание грантов Президента РФ. Было рекомендовано восемь кандидатур, из них С. А. Зиганшина и Н. М. Арсланов получили гранты Президента РФ на 2009–2010 гг. Две кандидатуры Учёный совет выдвинул на соискание премии им. Е. К. Завойского для молодых учёных, и Р. И. Салихов стал лауреатом этой премии, заняв первое место в 2009 году.

На заседаниях Учёного совета рассматривались все научно-организационные и хозяйственные вопросы, предусмотренные Уставом института, например, обсуждались финансовые отчёты, отчёты о ходе проведения капитального ремонта и другие важные для института вопросы.

В. К. Воронкова

Выездное заседание Президиума КазНЦ РАН

12 февраля 2009 года в Учреждении Российской академии наук Казанском физико-техническом институте им. Е. К. Завойского Казанского научного центра РАН состоялось выездное заседание Президиума КазНЦ РАН. В повестке заседания было несколько вопросов:

1. О приоритетных направлениях исследований, проводимых в КФТИ КазНЦ РАН.
Докладчик: директор КФТИ КазНЦ РАН, член-корр. РАН К. М. Салихов.
2. Об участии в 2009 году институтов КазНЦ РАН в “Программе фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2008–2012 гг.”.
Докладчики: директора институтов КазНЦ РАН.
3. Об итогах пилотного проекта совершенствования системы оплаты труда научных работников учреждений РАН в институтах КазНЦ РАН.
Докладчики: директора институтов КазНЦ РАН.
4. Информация об итогах комплексной проверки Института механики и машиностроения КазНЦ РАН.
Докладчик: директор ИММ КазНЦ РАН, член-корр. РАН Д. А. Губайдуллин.
5. Разное.

Главная задача выездного заседания Президиума КазНЦ РАН заключалась в знакомстве с исследованиями, проводимыми в КФТИ КазНЦ РАН. В работе заседания приняли участие члены Президиума: акад. О. Г. Синяшин, акад. А. Н. Гречкин, член-корр. РАН Е. Е. Никольский, член-корр. РАН К. М. Салихов, член-корр. РАН Д. А. Губайдуллин, член-корр. РАН И. С. Антипин, член-корр.

РАН В. Ф. Миронов, д.ф.-м.н. В. Ф. Тарасов, д.ф.-м.н. Р. Г. Зарипов, д.х.н. А. А. Карасик, к.т.н. Г. В. Стинский, д.б.н. В. М. Чернов, д.т.н. В. Н. Шлянников, к.т.н. Э. В. Шамсутдинов и члены Учёного совета КФТИ. Перед началом заседания гости посетили ряд лабораторий, осмотрели оборудование, на котором проводятся исследования. К. М. Салихов, выступая с докладом по первому вопросу, среди приоритетных направлений исследований, проводимых в КФТИ КазНЦ РАН, назвал нанофизику, взаимовлияние сверхпроводимости и магнетизма, спинтронику, поиск элементной базы квантовой информатики, оптоэлектронику, квантовую электронику, молекулярный магнетизм, создание наноконтактов, нанокатализаторов и высокоэффективных катализаторов на основе углеродных нанотрубок, ионный синтез и модификацию наноразмерных систем и субмикронных слоёв, в том числе ионный синтез магнитных наночастиц Fe, Co и Ni в различных полимерных матрицах и оптически активных средах на основе металлических наночастиц Cu, Ag и Au. Направление “квантовая когерентная оптика” объединяет в КФТИ исследования по созданию оптических когерентных процессоров и лазерных рефрижераторов нового поколения, использованию неклассического света в квантовых устройствах обработки информации, разработку оптической квантовой памяти с использованием фотонного эха. К. М. Салихов отметил, что успешно развивается направление “медицинская физика”.

Заслушав и обсудив сообщение директора КФТИ КазНЦ РАН, члена-корр. РАН К. М. Салихова о priori-



Участники выездного заседания Президиума КазНЦ РАН знакомятся с работой сверхвакуумной установки Multiprobe P.

тетных направлениях научных исследований, проводимых в Казанском физико-техническом институте им. Е. К. Завойского КазНЦ РАН, Президиум КазНЦ РАН постановил: “Одобрить деятельность КФТИ КазНЦ РАН, направленную на обеспечение высокого уровня

фундаментальных и прикладных исследований, проводимых институтом в соответствии с “Программой фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2008–2012 гг.”

В. К. Воронкова

IX Международный симпозиум по фотонному эхо и когерентной спектроскопии (ФЭКС’2009)

Сорок шесть лет назад в Казани сотрудниками нашего института – Уно Хермановичем Копвиллемом и Виленом Романовичем Нагибаровым – было предсказано явление светового эха, получившее в дальнейшем широкое применение в оптической спектроскопии и в работе оптических процессоров. Десять лет спустя в Казани, на базе КФТИ КФ АН СССР, состоялся Первый Всероссийский симпозиум по световому эхо и когерентной спектроскопии. Следующий симпозиум состоялся тоже в Казани только через восемь лет и благодаря поддержке акад. Л. В. Келдыша. В дальнейшем эти симпозиумы проводились раз в четыре года в различных городах СССР и РФ (в Харькове – в 1985, в Куйбышеве – в 1989, в Москве – в 1993, под Йошкар-Олой – в 1997, в Великом Новгороде – в 2001, в Калининграде – в 2005, и вновь в Казани – в 2009 году). Они стали очень популярными среди специалистов в области когерентной и квантовой оптики как в России, так и за рубежом. Здесь мы остановимся на аналитическом обзоре состоявшегося недавно (26–31 октября 2009 года) IX Международного симпозиума ФЭКС’2009 и на решении его участников, общая фотография которых приведена ниже.

Тематика Международного симпозиума ФЭКС’2009 тесно связана с научным направлением: “Когерентная и нелинейная оптика”, включающим, наряду с физикой оптических когерентных явлений, ещё и актуальные проблемы оптической когерентной спектроскопии на их основе. Всего на симпозиуме был сделан 121 научный доклад, из которых: 34 пленарных, 49 устных и 38 стендовых докладов. Значительная часть этих докладов была посвящена физике оптических переходных и коллективных явлений, в основе которых лежит фазовая память, а также оптической эхо-спектроскопии и оптической обработке информации на основе вышеуказанных явлений. Наиболее яркими из них являются, безусловно, фотонное (световое) эхо и оптическое сверхизлучение, с использованием которых связано одно из перспективных направлений разработок оптических фазовых процессоров. Кроме того, значительная часть докладов была посвящена актуальным проблемам квантовой оптики и квантовой памяти. В работе симпозиума ФЭКС традиционно принимало активное участие большое число молодых учёных. Так, и на ФЭКС’2009 свои доклады представили около 40 молодых учёных, аспирантов и студентов. Именно для них, в первую очередь, оказались полезными пленарные

заседания, на которых выступили известные российские и зарубежные учёные. Их доклады были полезными и для широкого круга специалистов, давно занимающихся данной проблематикой. В день открытия симпозиума ФЭКС'2009 были сделаны пленарные доклады в области фемтосекундной когерентной диагностики быстротекающих релаксационных и случайных процессов (проф. С. В. Чекалин, ИС РАН, Троицк, Россия), нанодиагностики твёрдотельных сред со сложной микроструктурой по спектрам множества одиночных флуоресцирующих молекул-зондов (д.ф.-м.н. А. В. Наумов с коллегами, ИС РАН, Троицк, Россия) и новых методов исследования квантовой динамики одиночных наночастиц с помощью функции распределения фотонов флуоресценции (проф. И. С. Осадько, ФИ РАН, Москва, Россия). Большой интерес вызвал пленарный доклад член.-корр. РАН Е. А. Виноградова (ИС РАН, Троицк, Россия), посвящённый резонансам термостимулированных электромагнитных возбуждений тонких плёнок на подложке в ближней зоне. Пленарные доклады следующего дня работы симпозиума продолжили эту тематику. Так, доклад проф. Ю. Г. Вайнера (ИС РАН, Троицк, Россия) был посвящён результатам экспериментального изучения быстрой колебательной динамики сложных твёрдотельных систем методами некогерентного фотонного эха и оптической спектроскопии одиночных молекул. Доклады проф. Н. Н. Рубцовой и с.н.с. Е. Б. Хворостова (ИФП СО РАН, Новосибирск, Россия) раскрыли особенности оптической эхо-спектроскопии газовых сред, а доклад д.ф.-м.н. А. А. Макарова (ИС РАН, Троицк, Россия) осветил проблемы фотонного эха в многоуровневых системах осцилляторного типа. Как известно, сигналы фотонного эха существенно слабее возбуждающих импульсов. В докладе проф. Н. В. Знаменско-

го (РНЦ "Курчатовский институт", Москва, Россия) были представлены результаты некоторых эхо-экспериментов в сверхизлучающем режиме. Большой интерес вызвал пленарный доклад с.н.с. Г. М. Сафиуллина с коллегами (КФТИ КазНЦ РАН, Казань, Россия), посвящённый фемтосекундному эхо-процессингу в полимерной легированной плёнке при комнатной температуре. В этом докладе были раскрыты перспективы создания высокотемпературного фемтосекундного эхо-процессора. На вечернем заседании (27 октября 2009 г.) было прочитано несколько докладов, тесно связанных с решением этой задачи. Среди них доклад м.н.с. А. В. Леонтьева с коллегами (КФТИ КазНЦ РАН, Казань, Россия), посвящённый когерентной оптической спектроскопии четырёхволнового смешения на кристалле CdS при комнатной температуре. Из этого доклада следует, что в роли перспективных носителей информации высокотемпературных фемтосекундных эхо-процессоров могут выступать и полупроводники. Отметим также устные доклады белорусской группы исследователей – в.н.с. О. Х. Хасанова с коллегами (ИФТТ и ПП НАНБ, Минск, Беларусь) по проблемам теории фемтосекундного фотонного эха в легированных полимерных плёнках и украинских исследователей – проф. А. Я. Дзюблика (ИЯИ НАН Украины, Киев, Украина) по результатам исследования распада ядер в поле лазера. Пленарные доклады, состоявшиеся 28 октября 2009 г., были посвящены эффектам когерентного распространения оптических импульсов в различных средах (и, прежде всего, в резонансных) и особенностям формирования в них солитонов. Особый интерес вызвали доклад проф. А. П. Сухорукова (МГУ, Москва, Россия) по эффектам столкновений оптических импульсов в нелинейных средах и доклад проф. А. И. Маймистова с коллегами (МИФИ,



Участники IX Международного симпозиума по фотонному эхо и когерентной спектроскопии (ФЭКС'2009).

Москва, Россия) по щелевым солитонам в волноводе. Отметим также пленарный доклад проф. С. В. Сазонова (РНЦ “Курчатовский институт”, Москва, Россия), посвящённый нелинейной оптике оптических импульсов длительностью всего в несколько периодов колебаний. Из вечерних устных докладов выделим выступление н.с. Е. Р. Кочаровской с коллегами (ИПФ РАН, Нижний Новгород, Россия) по проблеме коллективного спонтанного излучения в лазере на фотонном кристалле и доклад доцента С. О. Елютина (МИФИ, Москва, Россия) по нестационарным параметрическим процессам в средах с отрицательным преломлением. Пленарные доклады, состоявшиеся 29 октября 2009 г., были посвящены актуальным проблемам квантовой оптики, включая оптическую квантовую память. Так, доклад проф. С. Н. Молоткова (ИФТТ, Черноголовка, Россия) был связан с квантовой криптографией, а доклад проф. М. В. Чеховой с коллегами (МГУ, Москва, Россия) – с поляризационным сжатием в однопроходном параметрическом усилителе. Доклад проф. А. В. Масалова (ФИ РАН, Москва, Россия) раскрыл проблемы томографии поляризованного и неполяризованного света. Перспективы создания оптической квантовой памяти на основе перестраиваемых резонаторов обсуждались в пленарном докладе с.н.с. А. А. Калачёва (КФТИ КазНЦ РАН, Казань, Россия) и проф. С. Кроля (Технологический университет Лунда, Лунд, Швеция), а проблемы реализации нанооптического квантового процессинга на поверхностных поляритонах были раскрыты в пленарном докладе в.н.с. С. А. Моисеева (КФТИ КазНЦ РАН, Казань, Россия). Большой интерес у участников ФЭКС’2009 вызвал доклад проф. А. К. Ребане (Университет штата Монтана, Боземан, США), посвящённый оптическим переходным процессам и проблемам спектрального кодирования информации. Обсуждение всех этих вопросов продолжилось и на вечернем заседании. Пленарное заседание, состоявшееся 30 октября 2009 г., было посвящено актуальным проблемам гамма-оптики, лазерного охлаждения твёрдых тел и нанооптики. Среди выступлений наибольший интерес вызвали доклады с.н.с. Р. Н. Шахмуратова (КФТИ КазНЦ РАН, Казань, Россия) и Дж. Одюрса (Католический университет Левина, Левин, Бельгия) об особенностях распространения одиночного гамма-фотона в резонансной среде и проф. Э. К. Садыкова с коллегами (КГУ, Казань, Россия) – о проблемах квантовой интерференции в мёссбауэровской гамма-оптике, а также яркий доклад д-ра Жан-Пьера Гало (Национальный центр научных исследований, Орсей, Франция), посвящённый экспериментальным достижениям в области формирования вихревых световых полей с фазовыми сингулярностями. Очень полезной и эффективной оказалась стендовая секция (38 стендов), проходившая 28 октября 2009 г. и вызвавшая большой интерес участников симпозиума.

В целом, IX Международный симпозиум ФЭКС’2009 полностью выполнил свою программу и прошёл на высоком научном уровне. Наиболее актуальными с точки зрения мировой науки являются исследования:

- фемтосекундное фотонное эхо в легированных полимерных плёнках и полупроводниках при комнатной

температуре с целью последующего создания на их основе эхо-процессоров;

- фемтосекундная голография и эхо-голография;
- оптические логические квантовые устройства на основе кутритов и куквартов, а также проблемы оптической квантовой памяти на основе фотонного эха, субизлучения, сверхизлучения и других когерентных и коллективных эффектов;
- разработка проблем квантовой оптики и развитие эксперимента по их изучению;
- оптические солитоны и их реализация в микроструктурированных оптических волокнах;
- актуальные проблемы лазерной физики, в том числе самоохлаждающихся лазеров;
- гамма-оптика, гамма-сверхизлучение и гамма-лазеры.

Степень влияния российских учёных на решение упомянутых задач является существенной, о чём свидетельствует высокая степень цитирования их работ и книг по данному направлению исследований.

На заключительном заседании, которое состоялось 30 октября 2009 года, участники симпозиума отметили, в частности, что:

- доклады, отображающие современное состояние работ в области оптических переходных явлений и когерентной спектроскопии на их основе, были сделаны на высоком научном уровне и вызвали интерес участников симпозиума;
- одна треть участников симпозиума состояла из молодых учёных, в том числе аспирантов и студентов, для которых представленные доклады способствовали повышению их научного уровня и квалификации и послужили дополнительным стимулом к продолжению научной деятельности, а трибуна симпозиума явилась ареной, где они оттачивали своё ораторское мастерство;
- значительная часть докладов, представленных на симпозиуме, отражает результаты научных разработок, проведённых при финансовой поддержке РФФИ.

На основании вышесказанного участники симпозиума приняли следующее решение:

- считать организацию симпозиума ФЭКС’2009 отличной, а заявленные цели полностью достигнутыми;
- выразить благодарность оргкомитету симпозиума, ОФН РАН и РФФИ за отличную организацию и финансовую поддержку;
- пленарные доклады опубликовать в журнале “Известия РАН. Серия физическая”, устные и стендовые, после рецензирования, в журнале “Ученые записки КГУ. Серия “физико-математические науки”;
- просить программный и организационный комитеты симпозиума провести юбилейный X Международный симпозиум по фотонному эхо и когерентной спектроскопии в 2013 году в Йошкар-Оле.

В. В. Самарцев,
председатель организационного и программного комитетов Международного симпозиума ФЭКС’2009

I съезд молодых учёных РАН центрального региона

С 1 по 4 ноября 2009 года в Звенигороде прошёл I съезд молодых учёных Российской академии наук центрального региона. В съезде приняли участие представители большинства институтов РАН (по центральному региону) – 172 молодых учёных, а так же представители Сибирского, Уральского и Дальневосточного отделений. На встречу съехались молодые представители академических институтов самых разных научных направлений. Физики, лингвисты, химики, математики, механики, программисты, биологи в течение трёх дней обсуждали идею создания Совета молодых учёных при Президиуме РАН. Основными вопросами участников съезда к официальным лицам Российской академии наук были: “Зачем мы здесь собрались?” и “Что мы сможем реально сделать?” В течение нескольких дней эти и другие вопросы молодёжь могла задать вице-президентам РАН, академикам Сергею Михайловичу Алдошину и Валерию Васильевичу Козлову. Большое внимание съезду уделил профсоюз Российской академии наук.

Кроме организационных вопросов, связанных с выборами состава Совета молодых учёных РАН (по центральному региону) и утверждения Положения о Совете молодых учёных Российской академии наук, были проведены круглые столы по ряду вопросов. Вели круглые столы представители рабочей группы по формированию Совета молодых учёных РАН.

Круглый стол по функционированию центров коллективного пользования (ЦКП) уникальным и дорогостоящим оборудованием для научных исследований. В рамках круглого стола обсуждались вопросы использования ЦКП молодыми учёными, вопросы организации доступа к ЦКП (в том числе юридические проблемы) и вопросы финансирования. Основным выводом по итогам круглого стола является то, что в некоторых отраслях науки (биология, химия и др.) имеется ощутимый недостаток ЦКП и финансирования на приобретение уникального дорогостоящего оборудования, без которого нельзя осуществлять научные исследования. Ведь не секрет, что молодёжь “утекает” за границу, в частности, ещё и потому, что нет доступа к хорошему оборудованию для проведения экспериментов. Кроме того, в настоящее время отсутствует единый реестр ЦКП – учёные просто не знают, где можно воспользоваться необходимым оборудованием, которое уже имеется в наличии. Среди основных обсуждаемых проблем – условия доступа к уникальному оборудованию ЦКП для сторонних организаций. Участники съезда отмечали, что не всегда уникальное оборудование ЦКП используется широким кругом специалистов. Среди возможных путей решения проблем на съезде были названы: создание единого реестра ЦКП по отраслям; предоставление Правительством РФ финансирования для закупки уникального обо-



Участники I съезда молодых учёных РАН центрального региона (четвёртая слева в первом ряду – С. А. Зиганшина).

рудования; обязательное предоставление доступа к ЦКП заинтересованным организациям не менее определённого количества часов в месяц.

Круглый стол по социальным проблемам молодых учёных. Проблема жилья является одной из главных проблем для молодых учёных. Эта проблема особо актуальна в областных центрах, так как стоимость аренды жилья в них высока. В результате аспиранты и молодые учёные объединяются в группы по 4–5 человек и арендуют двух-трёхкомнатные квартиры на окраинах, что существенно бьёт по карману – более половины заработной платы тратится на жильё, а оставшаяся часть – на транспортные расходы (путь до работы занимает вплоть до нескольких часов). Ситуация ещё более осложняется при наличии у молодых учёных семьи и детей. В такой ситуации фактически невозможно заниматься наукой – все силы и время уходят на добывание денег. В результате у молодых учёных возникает дилемма – либо семья и работа в коммерческой организации, либо наука. Многие выбирают первое. Существующие социальные программы, например, сертификаты на жильё, не решают проблему – слишком их мало и не все молодые учёные проходят критерии отбора. Условия банковских кредитов (ипотека) и цены на квартиры не позволяют приобрести некоторым молодым учёным собственное жильё даже при рассрочке на 30 лет. В ходе обсуждения был предложен ряд решений жилищных проблем, в частности, – создание кооперативов молодых учёных для постройки жилья на землях, закреплённых за учреждениями РАН; передача прав на застройку участков земли, закреплённых за учреждениями РАН, в коммерческие организации с целью постройки жилых зданий и последующего заселения части квартир молодыми учёными; постройка общежитий для молодых учёных силами РАН. Как оказалось, для реализации предложенных мероприятий существует ряд юридических и организационных препятствий, пути преодоления которых молодым учёным пока неизвестны.

Круглый стол по ставкам для молодых учёных РАН. За круглым столом обсуждалась проблема ставок для молодых учёных. Проблема существовала всегда. После существенного сокращения штата институтов РАН (на 20%) ситуация ещё больше обострилась. В настоящее время в большинстве институтов проблема ставок решается путём деления одной ставки на несколько сотрудников, что существенным образом занижает средний уровень заработной платы. Другой способ решения проблемы – это введение институтами внебюджетных ставок по хоздоговорам. Ситуация в этом случае осложняется тем, что брать человека на такую ставку можно только на период действия хоздоговора, средняя продолжительность которого составляет не больше года. В результате трудовая книжка человека, проработавшего несколько лет на внебюджетной ставке, пестрит записями “принят по договору”, “уволен по собственному желанию”, причём таких записей за год может накопиться несколько, а в рабочем стаже при этом могут возникнуть существенные перерывы. Такое положение дел устраивает далеко не

всех молодых учёных, что ведёт опять же к их переходу в коммерческие организации.

Основным предложением, выдвинутым молодыми учёными по итогам круглого стола, является выделение дополнительных ставок учреждениям РАН, на которые можно зачислять ТОЛЬКО молодых учёных.

Круглый стол по инновациям. Вопрос о том, как сделать отечественную науку конкурентноспособной и быстро окупаемой породил массу мнений и споров. Молодые учёные не согласились с мнением, что надо быть и учёным, и менеджером в одном лице. С идеей о том, что продвижением и внедрением научных результатов должны заниматься квалифицированные менеджеры, либо специальные структуры власти, согласилось большинство участников съезда.

Кроме официальных заседаний, следует выделить некоторые дополнительные вопросы, которые обсуждались молодыми учёными кулуарно. В частности, активно велось обсуждение нашумевшего письма российских учёных, работающих за рубежом, Президенту и Премьер-министру РФ. Общее мнение молодых учёных было таково, что авторы письма слабо разбираются в основных проблемах научного сообщества в России и что им, видимо, не всё видно из-за границы, а предлагаемые ими решения выглядят несистемно и однобоко. Обращать внимание необходимо на своих молодых учёных, которых у нас достаточно. Их надо оберегать и давать им возможность работать у себя в стране.

Также молодыми учёными обсуждался вопрос интеграции науки и образования. Создаётся впечатление, что вузы и РАН хотят столкнуться лбами друг с другом. Об этом много говорят на самом высоком уровне, противопоставляя науку в РАН и вузах, много говорят о необходимости реструктуризации, интеграции и прочего. Однако, на самом деле, интеграция вузов и РАН уже давно существует и хорошо себя зарекомендовала. Так, в институтах РАН существуют базовые кафедры вузов, сотрудники институтов (в том числе и молодые учёные) ведут лекционные курсы и практические занятия в вузах. Аспиранты вузов проводят эксперименты на оборудовании и на территории институтов РАН, организуются общие семинары и конференции. Общим мнением молодых учёных съезда явилось то, что подобные взаимоотношения между РАН и вузами необходимо сохранять, и развивать интеграцию науки и образования в рамках сложившихся десятилетиями традиций.

В целом, съезд можно считать успешным – все мероприятия программы проведены, съезд состоялся. Дело сделано действительно важное и нужное – у молодых учёных РАН появились основания работать и заявлять о себе. Голос молодёжи может быть теперь услышан на самой вершине власти и для этого теперь есть и инструменты, и основания.

С. А. Зиганишина

Вышла в свет книга об электронном парамагнитном резонансе

В 2009 году в издательстве “AXAS Publishing Ltd.” (Веллингтон, Новая Зеландия) под редакцией К. М. Салихова издана книга “Electron Paramagnetic Resonance. From Fundamental Research to Pioneering Applications & Zavoisky Award” (“Электронный парамагнитный резонанс: от фундаментальных исследований к перспективным приложениям и премия имени Завойского”).

Эта книга создавалась как обращение к широкой аудитории читателей с целью дать возможность почувствовать вселенское значение открытия Евгения Константиновича Завойского, большую роль электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) в наших сегодняшних делах и сегодняшней жизни, замечательные перспективы в применении ЭПР, показать хотя бы небольшое число учёных, которые внесли и продолжают вносить заметный вклад в развитие ЭПР и его применений.

Можно надеяться, что выход этой книги будет способствовать дальнейшему развитию и расширению применений ЭПР-спектроскопии в мире, в целом, и в нашем институте и в Казани, в частности, будет способствовать повышению престижа, статуса Международной премии имени Е. К. Завойского, приумножит славу Казани как города с замечательными научными традициями.

Книга открывается вступительным словом Виталия Лазаревича Гинзбурга.

Первая часть книги посвящена первооткрывателю ЭПР Евгению Константиновичу Завойскому и изложению основ ЭПР.

Во второй части представлены лауреаты Международной премии имени Е. К. Завойского. Приведены сюжеты, написанные лауреатами специально для этой книги, и сюжеты о лауреатах.

В следующей части приведены примеры применения ЭПР в различных областях науки, техники, технологии и медицины. Примеры касаются проблем материаловедения (сверхпроводники, алмазы, лазерные кристаллы и т.д.), исследования фотосинтеза, молекулярного магнетизма, контроля качества продуктов и дозиметрии, археологии и т.д. Все сюжеты написаны ведущими экспертами, признанными лидерами мировой науки. При этом и авторы, и редактор книги приложили максимум усилий, чтобы сделать изложение как можно более понятным любому любознательному читателю, конечно, сохраняя научный уровень.

Книга очень красиво оформлена.

С удовольствием привожу здесь некоторые отзывы об этой книге.



Некоторые иллюстрации из книги “Electron Paramagnetic Resonance: From Fundamental Research to Pioneering Applications & Zavoisky Award” под ред. К. М. Салихова.

“Кев, вчера я также получил книгу по ЭПР, редактором которой ты был. Это настоящий шедевр – очень красивый макет и замечательное содержание! Мои поздравления. Я убеждён, что не только сообщество ЭПР извлечёт пользу из этого издания, оно показывает так много приложений и многое другое!” (проф. В. Любитц, Германия).

“Здорово! Ты создал великолепное произведение – с художественной и научной точек зрения, праздник для глаз и ума. Поздравления!” (проф. Дж. Фейер, США).

“Круто! Это настоящее произведение искусства, фантастика!” (проф. Г. Гешайдт, Австрия).

“Кев, твоя книга по ЭПР превосходна! Качеству научных статей полностью соответствует качество дизайна и печати. Тебе следует очень гордиться тем, что ты достиг этой уникальной книгой и быть счастливым. Ты оказал огромную услугу сообществу ЭПР и тем, чтобы заинтересовать новичков красотой ЭПР, и тем, чтобы взволновать экспертов ценностью их научной работы.” (проф. К. Мёбиус, Германия).

К. М. Салихов

Визит профессора Герда Котэ в физтех

Ежегодно несколько сотрудников института выезжают в краткосрочные командировки за рубеж. Кто-то едет поработать на оборудовании, которого нет у нас, кто-то просто набраться опыта. Для молодых специалистов и аспирантов знакомство с опытом работы ведущих научных школ очень полезно. Это возможно и в случае, если ведущий зарубежный специалист приезжает поработать в наш институт. К. М. Салихов давно мечтает, чтобы ведущие специалисты имели возможность регулярно работать в институте. И не просто мечтает, а прикладывает много усилий, чтобы мечты сбывались. В 2009 году по приглашению Кева Минуллинвича гостем нашего института был проф. Герд Котэ, учёный из одного из самых старейших высших учебных заведений Германии, Университета Фрайбурга. Проф. Г. Котэ работает в Институте физической химии этого университета и хорошо известен своими работами как в области ЯМР, так и времяразрешённого и импульсного ЭПР. Круг

его интересов очень широк: это реакционные центры фотосистемы 1, биорадикалы, применение новых методов ЯМР для исследования медленных движений в жидких кристаллах. Проф. Г. Котэ неоднократно бывал в Казани и выступал с докладами на конференциях. В 2009 году его визит также начался с участия в международной конференции “Современные достижения магнитного резонанса”, где он представил доклад “Exploring quantum oscillations in photo-excited triplet states” (“Исследуя квантовые осцилляции в фото-возбуждённых триплетных состояниях”). После окончания конференции Герд Котэ остался для работы в отделе химической физики ещё на полтора месяца. Г. Котэ подробно ознакомился с исследованиями, проводимыми в отделе методами ЭПР и ЯМР, принимал активное участие в обсуждении всех проблем, экспериментальных и теоретических. Проводя много времени с молодыми специалистами, участвуя в экспериментальных исследованиях, Г. Котэ стремился



Г. Котэ. Выступление на семинаре.



Обсуждение научных планов:слева направо: Р. Зарипов и Г. Котэ.



Г. Котэ с супругой и К. М. Салиховым во время визита в КФТИ.

максимально передать свои знания молодым. Кев Минуллинович увлёк Г. Котэ идеей реализации квантовых алгоритмов на электронных спинах, и он принял активное участие в поиске бирадикальных систем, перспективных для реализации квантовых вычислений.

Мы продолжаем сотрудничать с Г. Котэ по переписке, он интенсивно ведёт поиск бирадикалов, которые требу-

ются для успешной реализации квантовых вычислений. Визит проф. Котэ был полезен ещё и с точки зрения его ежедневного общения с молодыми сотрудниками и аспирантами. Поэтому мы и впредь будем стараться приглашать иностранных учёных на временную работу в нашем институте.

После отъезда из Казани, Герд Котэ поделился впечатлениями о своём визите:

“Во время моего визита в Казанский физико-технический институт у меня была возможность обсудить со своими локальными хозяевами их текущую научно-исследовательскую деятельность. Для меня эти дискуссии были как очень стимулирующими, так и поучительными. Было приятно увидеть, что самое высокое качество исследований казанской школы в области магнитного резонанса продолжается исключительно творческими и продуктивными молодыми студентами-исследователями и учёными.

Всесторонние дискуссии во время моего визита в Казань содействовали тому, чтобы начать совместный научно-исследовательский проект по использованию бирадикалов в качестве жидкостных квантовых систем для квантовой информатики. В частности, мы собираемся синтезировать новые стабильные бирадикалы с заданными спин-спиновыми взаимодействиями, которые позволят эффективно реализовать основные квантовые алгоритмы на электронных спинах. Я искренне надеюсь, что это сотрудничество будет иметь успех и сможет обеспечить новое понимание увлекательного мира квантовой информатики”.

В. К. Воронкова, К. М. Салихов

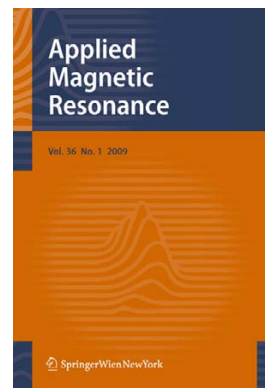
Журнал “Applied Magnetic Resonance”

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 члена-корр. РАН 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), а начиная с 1993 года, ежегодно, регулярно и с высоким качеством, удовлетворяющим требованиям международной научной общественности и издательства Шпрингер, выпускаются два тома (четыре выпуска каждый).

Impact factor журнала: 1995 – 0.95; 1996 – 0.656; 1997 – 0.665; 1998 – 0.811; 1999 – 0.659; 2000 – 0.776; 2001 – 0.737; 2002 – 0.673; 2003 – 0.874; 2004 – 0.665; 2005 – 0.743; 2006 – 0.692; 2007 – 0.706; 2008 – 0.748.

Журнал индексируется в Academic OneFile, Chemical Abstracts Service (CAS), Chemistry Citation Index, Compendex, Current Contents/Physical, Chemical and Earth Sciences, Gale, GeoRef, Google Scholar, Inspec, Journal Citation Reports/Science Edition, OCLC, Science Citation Index, Science Citation Index Expanded (SciSearch), SCOPUS, Summon by Serial Solutions, VINITY – Russian Academy of Science.

“Applied Magnetic Resonance” публикует оригинальные статьи, предпочтительно по новым приложениям техники магнитного резонанса и по новым экспериментальным методам. Рутинные приложения в структурной химии находятся вне тематики журнала. Журнал печатает приглашённые обзорные статьи по методам и приложениям ЯМР, ЯКР, ЭПР, мёсбауэровской спектроскопии и т.д. Публикуются специальные выпуски под редакцией известных учёных, посвящённые актуальным проблемам магнитного резонанса. Есть раздел информации о конференциях по магнитному резонансу и новому оборудованию, а также рецензий на новые книги.

“Applied Magnetic Resonance” опубликовал специальные выпуски оригинальных статей, подготовленных в рамках Амперовских конгрессов, а также ряда специали-

зированных Амперовских симпозиумов и международных конференций.

В 2009 году редакцией подготовлены 36 и 37 тома журнала, четыре выпуска каждый. Среди них – специальный выпуск, в котором собраны оригинальные статьи, подготовленные на основе приглашённых докладов 6-го Симпозиума Азиатско-тихоокеанского общества ЭПР (Кэрнс, Австралия, 13–18 июля 2008). В них нашли отражение современные достижения в различных областях ЭПР, включая приложения спектроскопии и томографии ЭПР в квантовых вычислениях, новых материалах, фотосинтезе, биологической неорганической химии, неорганической и органической химии, и медицины. Специальный выпуск, подготовленный проф. К. Мёбиусом (Свободный университет Берлина, Германия) и проф. К. М. Салиховым, посвящён 60-летию юбилею проф. В. Любитца. В. Любитц внёс значительный вклад в развитие и приложения спектроскопии магнитного резонанса. В этом выпуске журнала собраны статьи его друзей и коллег, представляющие современное положение магнитного резонанса и отражающие широкое разнообразие научных интересов В. Любитца.

С 1 июня 2009 года журнал перешёл полностью на электронный менеджмент через систему Editorial Manager (<http://apmr.edmgr.com/>).

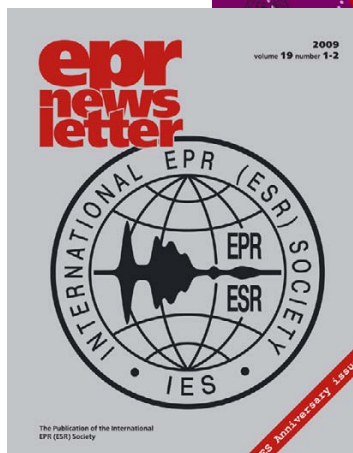
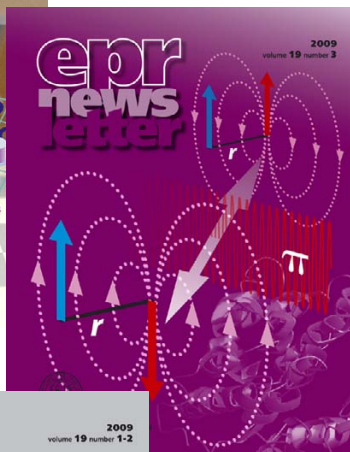
*Л. В. Мосина
заместитель главного редактора*

20 лет Международного общества ЭПР и многое другое в зеркале “EPR newsletter”

“EPR newsletter”, официальный орган Международного общества ЭПР (ЭСП) (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 [1–6].

Электронная версия вестника размещается на веб-сайте 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.

Самым знаменательным событием в жизни Международного сообщества ЭПР в 2009 году стал двадцатилетний юбилей МОЭ. Об этом напомнил Президент МОЭ Джек Фрид в своем обращении [7, с. 3]. В двадцать лет МОЭ ещё не достигло зрелости, но уже имеет славное прошлое, замечательное настоящее и стоит на пороге захватывающего будущего. Мы подготовили специальный выпуск “EPR newsletter”, который статьями Джека Фрида, Хала Сворца, Гарета и Сандры Итон, Киса МакЛохлана, Клауса Мёбиуса, Джона Пилброу, Кева М. Салихова, Хаима Леванона, Юрия Д. Цветкова, Такеджи Такуи, Вольфганга Любитца и Хитоши Охта [8, с. 3–15], а также Сушила Мисры [8, с. 32–35] прекрасно иллюстрирует это утверждение. Чтобы отпраздновать двадцатилетний юбилей МОЭ, после академической атмосферы Оксфорда (Великобритания) и экзотического волшебства Кэрнса (Австралия), в 2009 году годовое собрание МОЭ вернулось к величественным красотам Скалистых гор на симпозиуме по ЭПР в Сноумассе (Колорадо, США)



[9, с. 25–26]. Отчёт об этом собрании подводит итог двадцати лет деятельности МОЭ и представляет его достижения и прогресс в поощрении многочисленных приложений ЭПР в различных областях науки.

“EPR newsletter” приглашает вас в тур по джунглям теории функционала плотности с Франком Ниизе, самым квалифицированным экспертом в этой области [7, с. 10–14]. Гуннар Ешке, лауреат премии Брукера 2009, раскрывает вам тайны определения расстояний из данных по двойным резонансам [7, с. 15–16], а К. Илкер Сен и Питер П. Файер делятся своим опытом в анализе сигналов двойного электрон-электронного резонанса [8, с. 26–28]. Кис А. Эрл и Дэвид Будил подготовили руководство по подгонке спектров ЭПР в случае медленных движений [8, с. 28–30]. Детальный отчёт о вручении Международной премии им. Е. К. Завойского 2008 года проф. Михаэлю Мерингу (Университет Штутгарта, Германия) [7, с. 4] позволил нам ещё раз поздравить этого выдающегося учёного. Наша колонка “Другая страсть” ещё раз показывает, какие неизведанные глубины таит в себе человек, и, в конце концов, кто может сказать, что мы знаем кого-либо? На этот раз Кристофер Родс рассказывает о своих впечатлениях на пути своего становления как писателя и поэта [9, с. 9–12]. Продолжая публиковать истории о лабораториях, применяющих ЭПР в своих

исследованиях, мы предоставили свои страницы Джону Вайлю (отметившему свой 80-летний юбилей в 2009 году) и Марион Турнауэр, которые красочно рассказали об исследованиях в Аргоннской лаборатории (Иллинойс, США). Девкумар Мустафи, обладатель первой награды МОЭ для молодого исследователя в 1994 году, поделился своими мыслями о науке и показал нам свою эволюцию от ЭПР к магнитно-резонансной томографии [8, с. 22].

Как всегда, мы опубликовали информацию о том, что члены МОЭ могут подписаться на наш журнал “Applied Magnetic Resonance” с большой скидкой [7, с. 17]. Мы также представили читателям информацию о книгах “Электронный парамагнитный резонанс: от фундаментальных исследований к перспективным приложениям и премии имени Завойского” (под ред. Кева М. Салихова) и “Спектроскопия высокополевого ЭПР протеинов и их модельных систем” Клауса Мёбиуса и Антона Савицкого [7, с. 17].

Я рада, что у нас в редакции сложилась замечательная команда единомышленников: Томас Приснер (Институт физической химии, Франкфурт-на-Майне, Германия), помощник главного редактора по Европе, Кандис Круг (Медицинский колледж Висконсина, Милуоки, США), помощник главного редактора по Северной и Южной Америке, Хитоши Охта (Университет Кобе, Кобе, Япония), помощник главного редактора по Азиатско-тихоокеанскому региону, и Сергей Михайлович Ахмин, технический редактор. Работать вместе – это просто великолепно!

Литература

1. Мосина Л.В.: Казанский физико-технический институт имени Е. К. Завойского 2003. Ежегодник (Салихов К.М., ред.), с. 196–198. Казань: ФизтехПресс 2004.
2. Мосина Л.В.: Казанский физико-технический институт имени Е. К. Завойского 2004. Ежегодник (Салихов К.М., ред.), с. 215–216. Казань: ФизтехПресс 2005.
3. Мосина Л.В.: Казанский физико-технический институт имени Е. К. Завойского 2005. Ежегодник (Салихов К.М., ред.), с. 200–201. Казань: ФизтехПресс 2006.
4. Мосина Л.В.: Казанский физико-технический институт имени Е. К. Завойского 2006. Ежегодник (Салихов К.М., ред.), с. 254–255. Казань: ФизтехПресс 2007.
5. Мосина Л.В.: Казанский физико-технический институт имени Е. К. Завойского 2007. Ежегодник (Салихов К.М., ред.), с. 187–188. Казань: ФизтехПресс 2008.
6. Мосина Л.В.: Казанский физико-технический институт имени Е. К. Завойского 2008. Ежегодник (Салихов К.М., ред.), с. 203–204. Казань: ФизтехПресс 2009.
7. EPR Newsletter 18, no. 4 (2009)
8. EPR Newsletter 19, no. 1-2 (2009)
9. EPR Newsletter 19, no. 3 (2009)

*Л. В. Мосина
главный редактор*

Международная премия им. Е. К. Завойского 2009

Международная премия им. Е. К. Завойского учреждена в 1991 году. Эта премия получила поддержку Казанского физико-технического института им. Е. К. Завойского, Казанского государственного университета, Академии наук 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), Президиума РАН, а также Президента, Госсовета и Правительства Республики Татарстан. 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 (в 2009 году 1500 евро). 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.



Д. Гольдфарб и К. М. Салихов.

Церемония вручения этой престижной премии в 2009 году проходила в традиционном формате. Лауреат был выбран международным комитетом в следующем составе: К. М. Салихов (Казань, Россия), председатель, и члены: Дж. Фейер (Ла Хойа, США), Д. Гаттески (Флоренция, Италия), Х. М. МакКоннелл (Станфорд, США), К. А. МакЛохлан (Оксфорд, Великобритания) и К. Мёбиус (Берлин, Германия). В начале 2009 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 журнале “Applied Magnetic Resonance”, Амперовском бюллетене и “EPR newsletter”, официальном органе Международного общества ЭПР (ЭСР). Были рассмотрены все кандидатуры, названные до 1 апреля 2009 года. В результате широкого обсуждения всех кандидатур решение комитета было единодушным – лауреатом премии 2009 была названа Даниэлла Гольдфарб, профессор Вайцмановского научного института, Реховот, Израиль.

Проф. Гольдфарб была отмечена за выдающийся вклад в развитие ЭПР и, в частности, за её вклад в методологию импульсного высокополевого двойного электронно-ядерного резонанса и приложения к металлопротеинам и цеолитам. За девятнадцать лет существования этой премии, высокого звания лауреата были удостоены 22 выдающихся учёных из разных стран мира (в 1994 году, в ознаменование 50-летней годовщины открытия ЭПР, было названо три лауреата, а 2004 году, в ознаменование 60-летней годовщины открытия ЭПР, было названо два лауреата), среди них три представителя России – проф. Я. С. Лебедев и наши земляки, акад. К. А. Валиев и член-корр. РАН 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 резонанса”. В 2009 году она проходила с 28 сентября по 2 октября. Церемония вручения премии проходила 2 октября в здании Академии наук Республики Татарстан под председательством проф. К. М. Салихова. В ней участвовали докладчики конференции, а также учёные и студенты университетов и научно-исследовательских институтов Казани. К. М. Салихов объявил решение комитета. З. Р. Валеева, заместитель Премьера-министра Республики Татарстан, вручила проф. Д. Гольдфарб диплом лауреата, медаль и денежный чек. Лауреата тепло поздравили проректор КГУ, проф. Д. К. Нургалеев; Президент АН РТ, проф. А. М. Мазгаров; член

Международного комитета по присуждению премии им. Е. К. Завойского, проф. К. Мёбиус и заместитель председателя Президиума КазНЦ РАН, проф. Д. А. Губайдуллин. Лауреату были переданы поздравления от имени Амперовского общества, Международного общества ЭПР (ЭСР) и Международного общества магнитного резонанса.

Даниэлла Гольдфарб прочитала лекцию, в которой она рассказала об исследованиях спинов, молекул и магнетиков методами импульсного высокополевого двойного электронно-ядерного резонанса. Торжественное собра-

ние сопровождалось выступлением струнного квартета “Кантилена”. Церемония завершилась банкетом в честь лауреата.

Во время своего пребывания в Казани Даниэлла Гольдфарб посетила музей истории КГУ, где экспонируется экспериментальное оборудование Е. К. Завойского, и достопримечательности Казани.

*Л. В. Мосина
учёный секретарь комитета
по присуждению премии им. Е. К. Завойского*

Премия им. М. Л. Блатта 2009

Ежегодно через премию им. М. Л. Блатта научные сотрудники института выражают свою признательность и уважение тем работникам вспомогательных подразделений, которые не только добросовестно и неформально трудятся, но и благожелательно относятся к людям, которым они помогают.

Учёный совет Учреждения Российской академии наук Казанского физико-технического института им. Е. К. Завойского Казанского научного центра РАН принял решение: за чуткое, внимательное отношение к научным сотрудникам института, за многолетний добросовестный труд присудить премию 2009 года механику гаража Ивану Тимофеевичу Лукину.

Иван Тимофеевич работает в КФТИ с 14 февраля 1989 года. Начал работу водителем 3-го класса, через два года – водителем 1-го класса, с 1 апреля 1995 года и по сей день – механиком гаража. Обязательность, добросовестность, благожелательность – эти черты мы увидели у Ивана Тимофеевича с самого начала его работы в институте. В 90-ые годы прошлого века организовывалась доставка сотрудников института на работу и с работы на служебном автобусе. Иван Тимофеевич участвовал в этом процессе с самого начала. Он загодя готовил автобус, чтобы не опоздать, терпеливо ждал нас на пунктах сбора, был весел и приветлив. И по настоящее время



Иван Тимофеевич Лукин

научные сотрудники отмечают его исключительную доброжелательность, ответственность, безотказность в помощи по каким-либо проблемам, связанным с его работой. Иван Тимофеевич всегда выручит, всегда сдержит слово. Выручит и в радостные, и в грустные дни. Когда вспоминаешь об Иване Тимофеевиче, теплее становится на душе.

*В. Н. Лисин
председатель комитета по присуждению
премии имени М. Л. Блатта*

Репортаж с торжественного заседания, посвящённого проводам старого и встрече Нового года

29 декабря 2009 года, по традиции, в третий раз состоялось торжественное заседание коллектива КФТИ КазНЦ РАН, посвящённое подведению итогов уходящего старого года и поздравлению друг друга с наступающим Новым годом.

В начале торжественного заседания был исполнен гимн физтеха. С докладом о деятельности института в 2009 году выступил директор института, член-корр. РАН К. М. Салихов.

Ведущие новогоднего праздника Д. Д. Власова и П. А. Бородин открыли неофициальную часть торжественного заседания и пригласили д.ф.-м.н., проф. Х. Г. Богданову для поздравления юбиляров 2009 года. Восемидесятилетние юбилеи отметили д.ф.-м.н., проф., заслуженный деятель науки РФ и РТ М. М. Зарипов и токарь 10 разряда М. А. Файзуллин. Круглые даты также отметили А. И. Андреева, Н. А. Лисин, Н. Р. Садыков, В. П. Григорьев, М. И. Гарифуллина, Л. В. Мосина, О. О. Куприянова, С. А. Абдрахманова, М. И. Ибрагимова, Т. И. Халикова, Т. Х. Кодирова, Ю. В. Горюнов, Г. М. Сафиуллин, Н. Н. Гарифьянов и А. Р. Хисамов.

Д.ф.-м.н., проф. В. В. Самарцев в этом году отметил не только семидесятилетний юбилей, но и стал лауреатом Государственной премии Республики Татарстан в области науки и техники.

Руководитель группы по работе с кадрами и режиму Х. Л. Мухтасарова поздравила сотрудников института с юбилейным стажем.

В этом году профкомом и дирекцией КФТИ КазНЦ РАН было принято совместное решение по присуждению звания “Ветеран КФТИ”. Т. С. Альтшулер, Х. Г. Богдановой, Г. П. Вишневской, В. Н. Лисину, В. В. Самарцеву, Н. К. Соловарову, Г. Б. Тейтельбауму, С. Я. Хлебникову и Ф. Г. Черкасову были вручены памятные дипломы, удостоверения и цветы.

Традиционно в конце года были подведены итоги прошедшего ежегодного теннисного и волейбольного турниров. Один из организаторов турниров, И. В. Яцык, вручил ценные подарки и призы традиционному победителю С. И. Петрову и активным участникам соревнований.

Поступивших в 2009 году аспирантов представила председатель Совета молодых учёных КФТИ КазНЦ РАН С. А. Зиганшина, а К. М. Салихов – новых сотрудников, принятых в институт. Всем им вручили подарочные “наборы физтеховца”. В качестве посвящения аспиранты и вновь принятые сотрудники продемонстрировали всему коллективу физтеха, насколько хорошо они отгадывают загадки Снегурочки и Деда Мороза (Ю. З. Фаттаховой и А. Г. Шмелёва).

Торжественное заседание сопровождалось выступлениями сотрудников и аспирантов института. А. Г. Шмелёв исполнил песню “Лунный камень”, А. Б. Конов исполнил на гитаре произведение композитора Армика Дашчидаде, а д.ф.-м.н. Р. М. Баязитов – песни собственного сочинения.



Выступление д.ф.-м.н. Р. М. Баязитова.



Аспиранты КФТИ 1-го года обучения.



Аспиранты и вновь принятые сотрудники выполняют задание Снегурочки.

Директор КФТИ КазНЦ РАН, член-корр. РАН
К. М. Салихов с Дедом Морозом и Снегурочкой.



В завершении торжественного заседания, под музыку и звуки открываемого шампанского, К. М. Салихов произнёс тост, поздравляя сотрудников института с наступающим Новым 2010 годом, а затем всех собравшихся ждали новогодние конкурсы с призами, танцы и развлечения.

В заключение хочется отметить молодых сотрудников физтеха, которые принимали активное участие в организации вечера. Объявление о Новомодном вечере подготовили Л. И. Савостина и Р. Г. Гатиятов. Наряжали ёлку, украшали фойе и конференц-зал Н. Ю. Панарина, А. Г. Шмелёв, К. Б. Иванин и Л. И. Савостина. Оригинальную презентацию подготовил А. В. Леонтьев. Музыкальное

оформление торжественного заседания обеспечивали И. З. Латыпов и Р. Г. Гатиятов.

Фотографии были предоставлены И. В. Яцыком и А. П. Чуклановым.

*С. А. Зиганшина,
Д. Д. Власова*

Выступление К. М. Салихова на торжественном собрании, посвящённом проходам старого и встрече Нового года (29 декабря 2009 года)

Уважаемый физтех!
Дорогие коллеги!

В этом году мы потеряли ветеранов нашего института Юрия Серафимовича Грезнева и Дмитрия Яковлевича Осокина. Прошу почтить их память минутой молчания.

Коротко напомним основные результаты и события 2009 года.

Научные достижения

В этом году физтеховцы получили интересные научные результаты. Приведу только несколько примеров:

- С помощью метода ядерного магнитного резонанса ядер ^{51}V в сверхпроводящем состоянии трёхслойных плёнок Ni/V/Ni и $\text{Pd}_{1-x}\text{Fe}_x/\text{V}/\text{Pd}_{1-x}\text{Fe}_x$ впервые наблюдался эффект спинного экранирования (руководитель – И. А. Гарифуллин).

- Впервые при комнатной температуре экспериментально реализовано спектральное кодирование информации в процессе фемтосекундного эхо-процессинга в плёнке поливинилбутирала, легированной молекулами фталоцианина (руководители – В. С. Лобков и В. В. Самарцев).
- Впервые наблюдался фазовый переход из ферромагнитного в парамагнитное состояние в баллистических наноконтактах Ni при протекании через них тока высокой плотности (руководитель – А. А. Бухараев).

Премии, дипломы

Премии и награды, полученные нашими сотрудниками в этом году, отражают высокий уровень проводимых исследований.

В. В. Самарцев стал лауреатом Государственной премии Республики Татарстан в области науки и техники. Сердечно поздравляю Виталия Владимировича с этой высокой, заслуженной наградой.

Коллектив авторов: И. Б. Хайбуллин (посмертно), Р. М. Баязитов, М. Ф. Галяутдинов, Я. В. Фаттахов и Р. И. Баталов удостоен Международной премии им. Дж. Гиббонса.

Гумбольдтовскую стипендию получил А. Л. Степанов.

Почётные грамоты Президиума РАН и Совета профсоюзов РАН получили С. Г. Львов, Н. М. Сулейманов и В. А. Шустов.

Новыми лауреатами грантов Президента РФ для молодых кандидатов наук стали С. А. Зиганшина и Н. М. Арсланов.

Р. И. Салихов стал лауреатом Казанской премии им. Е. К. Завойского для молодых учёных.

Гранты РТ для молодых учёных получили А. А. Коналов и С. М. Хантемиров.



Диплом лауреата Международного молодёжного научного форума “Ломоносов” Н. И. Халитова, лаборанта лаборатории радиационной физики, студента кафедры химфизики (КГУ–КФТИ).

Одними из победителей 2009 года в конкурсе “50 лучших инновационных идей Республики Татарстан” стали А. И. Чушников и Д. В. Лебедев.

Стипендию им. Б. М. Козырева завоевал А. В. Леонтьев, а стипендию им. Н. С. Гарифьянова – А. К. Конов.

Премия им. М. Л. Блатта присуждена И. Т. Лукину.

Замечательных успехов добились студенты нашей совместной с КГУ кафедры химической физики: Э. Р. Байсупова, Р. Н. Кашапов, В. В. Клековкина и Н. И. Халитов. На научных конференциях они выступили с 19 докладами и были удостоены 7 медалей, дипломов, грамот и премий.

Всех этих сотрудников института и студентов горячо поздравляю и желаю им успехов в наступающем году.

Научные кадры

В 2009 году мы приняли в аспирантуру семь выпускников Казанского государственного университета.

В. К. Воронкова, Н. Е. Домрачева, А. Л. Степанов и Р. Н. Шахмуратов защитили докторские диссертации. ВАК уже утвердил защиту Виолеты Константиновны. Желаю им новых творческих достижений.

Р. Б. Зарипов, Р. И. Салихов, А. А. Суханов, Д. В. Лапаев, Д. А. Калашников и К. Р. Каримуллин защитили кандидатские диссертации. Руслан Зарипов уже получил диплом кандидата наук. Мы очень надеемся на этих молодых учёных; надеемся, что они и другие молодые учёные института приумножат славу физтеха, добьются выдающихся результатов.

В этом году к нам, на кафедру химической физики, пришли новые студенты 3-го курса. Надеюсь, что в будущем они станут физтеховцами.

Печатная продукция

В 2009 году опубликованы очередные номера журнала “Applied Magnetic Resonance”. Этот журнал вносит большой вклад в мировую известность физтеха. В этом году принципиально изменилась технология работы с рукописями и взаимодействия с авторами и рецензентами. С 1 июня этого года мы перешли на электронный менеджмент.

В 2009 году опубликованы четыре номера информационного вестника Международного общества ЭПР “EPR newsletter”. Усилиями главного редактора Л. В. Мосиной и технического редактора С. М. Ахмина этот вестник достиг очень высокого уровня.

Предметом гордости физтеха является ежегодник КФТИ. В этом году вышел очередной номер: “Казанский физико-технический институт имени Е. К. Завойского 2008. Ежегодник”. Это летопись нашего института. В создании ежегодника участвуют многие сотрудники института. Но организационная и технологическая работа по подготовке ежегодника выполняется В. К. Воронковой, Н. А. Карташёвой, С. М. Ахминым, Л. В. Мосиной. Спасибо им, спасибо всем.



Некоторые книги сотрудников института, изданные в 2009 году.

В этом году вышли из печати пять книг, две из которых изданы за рубежом:

- Petrushkin S.V., Samartsev V.V.: Laser Cooling of Solids. Cambridge: Cambridge Int. Sci. Publishing Ltd. 2009.
- Salikhov K.M. (sci. ed.): Electron Paramagnetic Resonance: From Fundamental Research to Pioneering Applications & Zavoisky Award. "The Treasures of Eureka", vol. 1. Wellington, New Zealand: AXAS Publishing Ltd. 2009.

Президент Международного общества ЭПР в 2007–2009 гг. проф. Вольфганг Любитц так отзывался о книге "Electron Paramagnetic Resonance: From Fundamental Research to Pioneering Applications & Zavoisky Award": "Кев, вчера я также получил книгу по ЭПР, редактором которой ты был. Это настоящий шедевр – очень красивый макет и замечательное содержание! Мои поздравления. Я убежден, что не только сообщество ЭПР извлечёт пользу из этого издания, оно показывает так много приложений и многое другое!"

Премия имени Е. К. Завойского 2009

Успешно провели мы ежегодную конференцию "Современные достижения магнитного резонанса". К этому событию мы приурочиваем вручение премии им. Е. К. Завойского. В этом году лауреатом стала профессор Вайцмановского научного института Даниэлла Гольдфарб (Реховот, Израиль).

2009 год отмечен несколькими юбилеями

Ветеранам института – Максуту Мухамедзяновичу Зарипову и Минрахману Абдурахмановичу Файзуллин



Лауреат Международной премии им. Е. К. Завойского 2009 года Даниэлла Гольдфарб (Израиль).

в этом году исполнилось по 80 лет. Это замечательный юбилей. Желаю им здоровья до 120 лет.

70-летие отметил Виталий Владимирович Самарцев. 70 лет – это, наверное, конец юности, но это ещё не старость, наверняка. Поэтому я желаю Виталию Владимировичу новых творческих достижений.

Замечательный юбилей был у Аллы Ивановны Андреевой.

Я всегда и всем желаю быть здоровым до 120 лет. Половину этого пути прошли Ляйля Васильевна Мосина, Нияз Рифгатович Садыков, Николай Александрович Лисин, Вячеслав Петрович Григорьев и Мария Ивановна Гарифуллина.

Всем юбилярам большое спасибо за их самоотверженную работу.

20 лет журналу "Applied Magnetic Resonance"

Мы в этом году отмечаем славный юбилей. 20 лет мы выпускаем международный журнал "Applied Magnetic Resonance". Этот журнал занял достойное место среди других научных журналов. Достигнутые показатели впечатляют. Современное состояние журнала в очень большой степени связано с вдохновенной и самоотверженной работой Л. В. Мосиной, С. М. Ахмина, а также О. Б. Яндугановой и Д. В. Ильматовой.

Работа вспомогательных служб

Научная работа поддерживается самоотверженной работой всех вспомогательных служб. Всем большое спасибо.

Проблемы. Что делать?

Я бы выделил две важнейшие проблемы:

1. Аспирантуру заканчивают весьма многообещающие учёные, их обязательно надо брать на работу в институт, а бюджетные ставки все заняты.
2. Сокращение базового бюджетного финансирования в 2009 и 2010 гг.

На все вызовы судьбы у нас, как всегда, ответ такой: будем работать, работать лучше.

Здесь можно выделить такие задачи:

- надо постоянно повышать квалификацию сотрудников;
- надо научиться успешно работать в условиях относительного сокращения базового финансирования института;
- надо активнее участвовать в различных конкурсах на гранты;
- надо участвовать в реализации социально значимых государственных проектов:
 - разработка магнитно-резонансных томографов;
 - создание Поволжского федерального университета и др.

Дорогие физтеховцы, вам и вашим семьям искренне желаю счастливого Нового года. Всем желаю здоровья, благополучия, удач и успехов.

В заключение разрешите напомнить слова из гимна физтеха:

*Живи и процветай, физтех!
Гордимся мы тобой всегда!
Мы преумножим твой успех,
Сил не жалея и труда!*

Спасибо за внимание.



2009 год в цифрах

Кадры (на 1 декабря 2009 г.)

Уволены

1. Грезнев Ю.С., гл. спец.
2. Можанова А.А., мл. науч. сотр.
3. Осокин Д.Я., гл. науч. сотр. (с 20.12.2009)
4. Силантьева Д.И., науч. сотр.
5. Тагирова Р.Р., мл. науч. сотр.
6. Цейтлин М.П., ст. науч. сотр.
7. Цейтлин О.А., инженер

Приняты

1. Ануфриев В.К., слесарь-сантехник
2. Гайдук К.П., бухгалтер 2 категории
3. Галявиев И.Г., мл. науч. сотр.
4. Июдин В.С., мл. науч. сотр.
5. Леонтьев А.В., мл. науч. сотр.
6. Одиванов В.Л., инженер-электроник
7. Пудиков Ю.В., уборщик служебных помещений
8. Салихов Р.И., инженер 2 категории
9. Ситдыкова Х.М., контролёр КПП
10. Суханов А.А., мл. науч. сотр.
11. Яцык И.В., науч. сотр.

Среднегодовая численность (человек)

- Общая численность – 193 (из них 30 совместителей)
- Научных сотрудников – 115 (из них 13 совместителей)
- Членов-корреспондентов РАН – 1
- Действительных членов АН РТ – 1
- Членов-корреспондентов АН РТ – 2
- Докторов наук – 23 (из них 2 совместителя)
- Кандидатов наук – 69 (совместителей нет; из них 63 в научных подразделениях)

Средний возраст (лет)

- Докторов наук – 64.9
- Кандидатов наук – 47.1
- Научных сотрудников без степени – 40.6

Финансирование (в тыс. руб. на 1 января 2010 г.)

- Общий объем – 100315.6
- Финансирование РАН – 78159.2, из него:
 - базовое – 61697.0
 - целевое – 16462.2, в том числе кап. ремонт – 3000.0
- Федеральное агентство по науке и инновациям (Роснаука) – 9491.0, в том числе:
 - государственные контракты – 7071.0
 - грант Президента РФ для государственной поддержки молодых российских учёных – кандидатов наук – 1350.0
- Гранты РФФИ – 10302.1, из них:
 - инициативные проекты – 7706.6
 - развитие материально-технической базы (МТБ) – 500.0
 - издательские проекты – 135.0
 - региональные проекты – 700.0
 - организация и участие во всероссийских и международных научных мероприятиях на территории России – 480.0
 - участие молодых российских учёных в научных мероприятиях, проводимых на территории РФ – 38.0
 - участие российских учёных в международных мероприятиях за рубежом – 327.5
 - участие молодых российских учёных в международных мероприятиях за рубежом – 65.0
 - международные проекты – 350.0
- Прочие договора и контракты – 2363.4

Публикации

- Монографии и сборники – 12
- Учебные пособия – 2
- Статьи: всего – 205,
из них:
 - в зарубежных изданиях – 62
 - в отечественных центральных журналах – 57
 - в других изданиях – 86
- Тезисы: всего – 261,
из них:
 - в зарубежных изданиях – 166
 - в других изданиях – 95

Темы, финансируемые из госбюджета (Отделение физических наук РАН)

1. Исследование молекулярной и спиновой динамики и роли квантовой когерентности в фотоиндуцированных процессах, исследование возможностей использования спин-зависимых фотохимических и фотофизических процессов в реализации алгоритмов квантовой информатики, развитие методов радиоспектроскопии и оптической спектроскопии.
2. Получение и исследование низкоразмерных структур, наноструктур, самоорганизующихся систем, углеродных нанотрубок и спиновых кластеров – новых материалов квантовой информатики, оптоэлектроники, спинтроники.
3. Изучение методами сканирующей зондовой микроскопии наноструктур с магниторезистивными и каталитическими свойствами.
4. Разработка физико-химических основ ионно-лучевой модификации материалов для нелинейной оптики, опто- и магнитосенсорной электроники и спинтроники: диагностика и исследование новых тонкоплёночных наноструктур, формируемых имплантацией ионов примеси в диэлектрические и полупроводниковые матрицы.
5. Экспериментальное и теоретическое исследование проявлений магнетон-фононного и электрон-фононного взаимодействий в акустике и оптике магнетиков и наночастиц с магнитными примесями.
6. Исследование примесных ионов, кластеров и низкоразмерных систем в твёрдых телах спектроскопическими методами.
7. Создание и исследование жидкокристаллических, твёрдых и полимерных наноструктурированных материалов на основе металлокомплексов с фото- и термочувствительными магнитными и оптическими свойствами.
8. Исследование сверхпроводимости, магнетизма и фазовых переходов в материалах с сильными электронными корреляциями.
9. Исследование взаимодействия сверхпроводимости и магнетизма в наноструктурах сверхпроводник/магнетик.
10. Фундаментальные проблемы функционирования оптической фазовой памяти на основе явлений типа фотонного эха и сверхизлучения в примесных кристаллах и нанообъектах и разработка оптимальных режимов использования неклассического света в квантовых устройствах обработки информации.
11. Разработка новых методов и повышение диагностических возможностей низкополевой ЯМР-томографии.
12. Радиоспектроскопические и биофизические исследования механизмов патологий нервной и сердечно-сосудистой систем. Развитие радиоспектроскопических методов диагностики молекулярных и клеточных нарушений.
13. Разработка параллельных алгоритмов и программ для моделирования физико-механических процессов.

Проекты, финансируемые на конкурсной основе

Для проектов, выполняемых несколькими организациями, указаны координаторы от КФТИ.

2. *Поддержка проведения научных школ для молодых учёных.*

Самарцев В.В., д.ф.-м.н.; Воронкова В.К., д.ф.-м.н.

Программы фундаментальных исследований Президиума РАН

1. *Квантовая физика конденсированных сред.*

- Исследование микроскопического расслоения на магнитные и металлические фазы в сверхпроводящих соединениях. Тейтельбаум Г.Б., д.ф.-м.н.
- Изучение эффектов спиновой поляризации магнитных примесей и электронного остова в кондо-полупроводниках. Альтшулер Т.С., к.ф.-м.н.
- Квантовая память на основе когерентных и переходных явлений и оптическая многоканальная обработка информации. Самарцев В.В., д.ф.-м.н.

2. *Разработка фундаментальных основ создания научной распределённой информационно-вычислительной среды на основе технологий GRID.*

Возможность применения электронных спинов в квантовом исчислении. Салихов К.М., д.ф.-м.н.

3. *Основы фундаментальных исследований нанотехнологий и наноматериалов.*

Разработка методики исследования состава, строения и свойств наномодифицированных веществ и наноматериалов методами твёрдотельного ЯМР, ЭПР-спектроскопии, просвечивающей и сканирующей электронной микроскопии, атомно-силовой и туннельной микроскопии. Файзрахманов И.А., д.ф.-м.н.

4. *Фундаментальные науки – медицине.*

Разработка оригинального программного обеспечения для специализированного травматологического магнитно-резонансного томографа с индукцией магнитного поля 1.5 Тл. Салихов К.М., д.ф.-м.н.

Программа Президиума РАН “Поддержка инноваций и разработок”

Разработка усилителя тока градиентов для специализированного магнитно-резонансного томографа с индукцией магнитного поля 1.5 Тл. Салихов К.М., д.ф.-м.н.

Целевая программа Президиума РАН “Поддержка молодых учёных”

1. *Поддержка деятельности институтов РАН по привлечению талантливой молодёжи к научной работе.*

Салихов К.М., д.ф.-м.н.

Программы фундаментальных исследований Отделения физических наук РАН

1. *Физика новых материалов и структур.*

- Синтез жидкокристаллических лантаноидсодержащих нанокластеров с управляемой поляризованной люминесценцией и создание композитов на их основе. Салихов К.М., д.ф.-м.н.

- Нанотрубные слои и углерод-металлические композиты как каталитические, абсорбционные и автоэмиссионные среды для водородной энергетики, топливных элементов и источников электронов. Сулейманов Н.М., д.ф.-м.н.; соруководитель – Бухараев А.А., д.ф.-м.н.

- Создание жидкокристаллических наноматериалов с фотопереключаемыми оптическими и магнитными (спин-переменными) свойствами. Овчинников И.В., д.ф.-м.н.

- Исследование особенностей проявления нелинейно-оптического, анизотропно-магнитного и электронного отклика в наноструктурах, формируемых ионной имплантацией. Файзрахманов И.А., д.ф.-м.н.

- Создание гетероструктур для кремниевой оптоэлектроники в сильно неравновесных условиях роста и примесного легирования и исследование их свойств. Баязитов Р.М., д.ф.-м.н.

- Исследование наноструктурированных, анизотропных, ферромагнитных плёнок, полученных в полупроводниковых и полимерных матрицах методом ионно-лучевого синтеза во внешнем магнитном поле. Петухов В.Ю., д.ф.-м.н.

2. *Спин-зависимые эффекты в твёрдых телах и спинтроника.*

Теоретическое и экспериментальное исследование возможностей создания спинового клапана на основе наноконтактов и слоистых гетероструктур. Гарифуллин И.А., д.ф.-м.н.

3. *Сильнокоррелированные электроны в полупроводниках, металлах, сверхпроводниках и магнитных материалах.*

Локальные свойства сильнокоррелированных сверхпроводящих и магнитных систем. Тейтельбаум Г.Б., д.ф.-м.н.

4. *Фундаментальная оптическая спектроскопия и её приложения.*

Когерентная оптическая спектроскопия перспективных примесных кристаллов. Самарцев В.В., д.ф.-м.н.

5. *Фундаментальная основы акустической диагностики искусственных и природных сред.*
Когерентные акустооптические режимы охлаждения примесных аморфных сред и нанообъектов. Самарцев В.В., д.ф.-м.н.

Федеральные целевые научно-технические программы “Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2012 гг.”

1. *Мероприятие 5.2. “Развитие сети центров коллективного пользования научным оборудованием”*
– Обеспечение центром коллективного пользования научным оборудованием комплексных исследований в области создания и исследования нано- и мезоскопических объектов магнитно-резонансными методами. Координаторы от КФТИ: Салихов К.М., д.ф.-м.н.; Тарасов В.Ф., д.ф.-м.н.
– Проведение поисковых научно-исследовательских работ в области физико-химии наноматериалов и молекулярных систем, включая биологические, в центре коллективного пользования научным оборудованием “Федеральный центр коллективного пользования физико-химических исследований веществ и материалов”. Координаторы от КФТИ: Салихов К.М., д.ф.-м.н.; Тарасов В.Ф., д.ф.-м.н.

Федерально-целевая программа “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России” на 2009–2013 гг.

Мероприятие 1.1. “Исследование наноразмерных систем, перспективных для квантовой информатики, спинтроники, оптоэлектроники и квантовой электроники”. Салихов К.М., д.ф.-м.н.

Целевая научно-техническая программа “Разработка уникальных научно-исследовательских приборов и оборудования для учреждений РАН”

Фемтосекундный технологический комплекс ИК-УФ-диапазона для нанотехнологий и обработки материалов с высоким пространственным разрешением. Лобков В.С., к.ф.-м.н.

Конкурсы Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ)

Инициативные проекты

1. Альтшулер Т.С., к.ф.-м.н.: Дальнодействующее взаимодействие между магнитными примесями в бориде редких земель и элементов переходной группы (№ 09-02-00727)
2. Базаров В.В., к.ф.-м.н.: Сверхпроводящие проволоки из нанокompозитов на основе MgB_2 и металлических порошков, и токонесущие свойства таких материалов (№ 08-08-12175)
3. Баязитов Р.М., д.ф.-м.н.: Исследование механизмов роста и свойств нанокристаллических слоёв полупроводниковых силицидов в кремнии, полученных методами ионной имплантации и молекулярно-лучевой эпитаксии (№ 08-02-01280)
4. Богданова Х.Г., д.ф.-м.н.: Изучение магнитоупорядоченных веществ с аномальными магнитоэлектрическими свойствами (№ 08-02-00904)
5. Бухараев А.А., д.ф.-м.н.: Изучение влияния спинполяризованного тока большой плотности на намагниченность металлических наночастиц (№ 09-02-00568)
6. Гайнутдинов Х.Л., д.б.н.: Исследование механизмов формирования, сохранения и реконсолидации долговременной памяти у виноградной улитки (№ 07-04-00224)
7. Галяметдинов Ю.Г., д.х.н.: Высокодихроичные люминесцентные среды с управляемой поляризацией на основе металломезогенов (№ 08-03-00900)
8. Гарифуллин И.А., д.ф.-м.н.: Исследование новых особенностей эффекта близости сверхпроводник/ферромагнетик (№ 08-02-00098)
9. Гумаров Г.Г., к.ф.-м.н.: Исследование механохимических превращений, биохимических и лечебных свойств механоактивированного нанодисперсного кальция глюконата (№ 07-03-96005)
10. Зиганшина С.А., к.х.н.: Изучение размерных эффектов при электрокатализе на наночастицах металлов методами сканирующей зондовой микроскопии и вольтамперометрии (№ 07-03-00860)
11. Калачёв А.А., к.ф.-м.н.: Оптическая квантовая память: базовые принципы функционирования и экспериментальная реализация в примесных кристаллах (№ 09-02-00206)
12. Лобков В.С., к.ф.-м.н.: Спектральное кодирование информации в фемтосекундных эхо-процессорах и роль ультрабыстрых случайных процессов в потере информации (№ 09-02-00136)
13. Овчинников И.В., д.ф.-м.н.: Термо- и фотопереключаемый магнетизм жидкокристаллических соединений железа со спин-переменными свойствами (№ 08-02-01348)
14. Петрушкин С.В., к.ф.-м.н.: Фундаментальные проблемы и физические принципы когерентного фемто-

- секундного лазерного охлаждения легированных наноструктур и полимерных плёнок (№ 07-02-00883)
15. Салихов К.М., д.ф.-м.н.: Синтез и исследование с помощью импульсных методов электронного парамагнитного резонанса жидкокристаллических комплексов дикетонатов лантанидов с основаниями Льюиса (№ 09-03-00612)
 16. Самарцев В.В., д.ф.-м.н.: Разработка новых методов фемтосекундной оптической эхо-спектроскопии и диагностики быстропротекающих процессов в призматических твёрдотельных системах (№ 08-02-00032)
 17. Сулейманов Н.М., д.ф.-м.н.: Электрохимическое поглощение водорода углеродными наноструктурными материалами (№ 09-08-01099)
 18. Тейтельбаум Г.Б., д.ф.-м.н.: Фазовое расслоение и квантовые флуктуации в сильнокоррелированных электронных системах (№ 07-02-01184)
 19. Хайбуллин Р.И., к.ф.-м.н.: Исследование природы явления анизотропного ферромагнетизма в оксидных полупроводниках, имплантированных ионами переходной группы железа (№ 07-02-00559)

РФФИ и Белорусский республиканский фонд фундаментальных исследований

Самарцев В.В., д.ф.-м.н.: Разработка физических принципов функционирования высокотемпературных фемтосекундных твёрдотельных эхо-процессоров (№ 08-02-90001_Бел)

Региональные гранты РФФИ

1. Гайнутдинов Х.Л., д.б.н.: Исследование изменений оксида азота и его метаболитов при патологиях сердечно-сосудистой системы у крысы при десимпатизации и гипокинезии методом ЭПР-спектроскопии (№ 09-04-97020-р_Поволжье)
2. Тарасов В.Ф., д.ф.-м.н.: Квантовые запутанные состояния высокоспиновых электронно-ядерных систем (№ 09-02-97006_регион)

3. Шакуров Г.С., к.ф.-м.н.: Определение валентного состояния висмута в кристалле PbRbCl_5 методом ЭПР-спектроскопии (№ 09-02-97008_регион)

Издательские проекты

Самарцев В.В., д.ф.-м.н.: Издание русского перевода книги Л. Новотного и Б. Хехта “Основы нанооптики” (№ 09-02-07008_д)

Проекты развития материально-технической базы научных исследований

Салихов К.М., д.ф.-м.н.: Развитие МТБ для проведения исследований по области знаний 02 (№ 09-02-05023_б)

Организация российских и международных научных мероприятий на территории России

- Салихов К.М., д.ф.-м.н.: Организация и проведение IV Научно-практического семинара “Актуальные проблемы физики конденсированных сред” (№ 09-02-06136_г)
- Самарцев В.В., д.ф.-м.н.: Организация и проведение IX Международного симпозиума по фотонному эхо и когерентной спектроскопии (№ 09-02-06166_г)
- Салихов К.М., д.ф.-м.н.: Организация и проведение Международного симпозиума “Современное развитие магнитного резонанса” (№ 09-02-06180_г)

Международные гранты

1. Вавилова Е.Л., к.ф.-м.н.: Магниторезонансные исследования наноразмерных квантовых магнетиков (№ 08-02-91952-ННИО)
2. Гарифуллин И.А., д.ф.-м.н.: Исследование квантовых наноманетиков методом магнитного резонанса (DFG project 436 RUS 113/936/0-1)

Важнейшие результаты фундаментальных исследований, вошедшие в отчёт РАН в 2008 году

Физика конденсированных сред

В антиферромагнитном кристалле $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ обнаружен и исследован новый механизм акустооптической дифракции, обусловленный модуляцией поперечным звуком поляризаций нормальных световых мод (КФТИ КазНЦ РАН) (Раздел: Важнейшие научные достижения).

Публикации сотрудников института

Монографии и сборники

1. Petrushkin S.V., Samartsev V.V.: *Laser Cooling of Solids*. Cambridge: Cambridge Int. Sci. Publishing Ltd. 2009. 236 p.
2. Salikhov K.M. (sci. ed.): *Electron Paramagnetic Resonance: From Fundamental Research to Pioneering Applications & Zavoisky Award*. "The Treasures of Eureka", vol. 1. Wellington, New Zealand: AXAS Publishing Ltd. 2009. 209 p.
3. Mozzhukhin G.V., Rameev B.Z., Doğan N., Aktaş B.: The Two-Frequency Multipulse Sequence in Nuclear Quadrupole Resonance of N-14 Nuclei. "Explosives Detection Using Magnetic and Nuclear Resonance Techniques" (Fraissard. J., Lapina O., eds.), pp. 205–230. Nato Science for Peace and Security Ser. B: Phys. and Biophys. Netherlands: Springer 2009.
4. Stepanov A.L.: *Laser Annealing of Composite Materials with Metal Nanoparticles*, chapt. 2. "High-Power and Femtosecond Lasers" (Barret P.-H., Palmer M., eds.), pp. 27–70. New York: NOVA Sci. Publishers 2009.
5. Stepanov A.L.: *Fabrication of Metal Nanoparticles in Polymer by Ion Implantation*. "Nanostructured Materials for Advanced Technological Applications" (Reithmaier J.P., Petkov P., Kulisch W., Popov C., eds.), pp. 153–162. Berlin: Springer 2009.
6. Stepanov A.L., Kiyani R., Reinhardt C., Seidel A., Passinger S., Chichkov B.N.: *Rapid Laser Prototyping of Polymer Based Nanoplasmonic Components*. "Nanostructured Materials for Advanced Technological Applications" (Reithmaier J.P., Petkov P., Kulisch W., Popov C., eds.), pp. 163–171. Berlin: Springer 2009.
7. Евсеев И.В., Рубцова Н.Н., Самарцев В.В.: *Фотонное эхо и фазовая память*. Казань: КГУ 2009. 490 с.
8. Евсеев И.В., Рубцова Н.Н., Самарцев В.В.: *Когерентные переходные процессы в оптике*. М.: Физматлит 2009. 536 с.
9. Козлов С.А., Самарцев В.В.: *Основы фемтосекундной оптики*. М.: Физматлит 2009. 292 с.
10. Самарцев В.В.: *Когерентная оптическая спектроскопия примесных твердотельных сред*. "Оптическая спектроскопия и стандарты частоты. Спектроскопия конденсированных сред. Лазеры и стандарты частоты", т. 3 (Виноградов Е.А., Сеница Л.Н., ред.), с. 82–104. Томск: Изд-во Ин-та оптики атмосферы СО РАН 2009.
11. Попов И.И., Козлов В.А., Самарцев В.В., Зинов В.Г., Яшин В.Г. (ред.): *Материалы Четвёртой междунар. науч. школы "Наука и инновации-2009"* (ISS "SI-2009"); *Материалы Четвёртого междунар. науч. семинара "Фундаментальные исследования и инновации"* и *Всерос. молодёжного науч. семинара "Наука и инновации-2009"*. Йошкар-Ола: МарГУ 2009. 345 с.
12. Салихов К.М. (ред.): *Казанский физико-технический институт имени Е. К. Завойского 2008. Ежегодник*. Казань: ФизтехПресс 2009. 244 с.

Учебные пособия

1. Зарипов М.М.: *Основы теории спектров электронного парамагнитного резонанса в кристаллах*. Курс лекций. Казань: КГУ 2009. 212 с.
2. Ибрагимов И.Р., Фалин М.Л., Мухлисуллина М.М., Герасимов К.И.: *Измерение внешних и внутренних лазерных параметров. Метод. руководство к лаб. работам по общей и эксперим. физике*. Казань: ТГГПУ 2009. 40 с.

Статьи*

1. Akdogan N., Nefedov A., Zabel H., Westerholt K., Becker H.W., Somsen C., Gok S., Bashir A., Khaibullin R.I., Tagirov L.R.: High temperature ferromagnetism in Co-implanted TiO₂ rutile. *J. Phys. D: Appl. Phys.* **42**, iss. 11, 115005(1-11) (2009)
2. Akdogan N., Rameev B., Güler S., Ozturk O., Aktaş B., Zabel H., Khaibullin R., Tagirov L.: Six-fold in-plane magnetic anisotropy in Co-implanted ZnO (0001). *Appl. Phys. Lett.* **95**, iss. 10, 102502(1-3) (2009)
3. Akdogan N., Zabel H., Nefedov A., Westerholt K., Becker H.W., Gok S., Khaibullin R.I., Tagirov L.R.: Dose dependency of ferromagnetism in Co-implanted ZnO. *J. Appl. Phys.* **105**, iss. 4, 043907(1-8) (2009)
4. Alfonsov A., Vavilova E., Kataev V., Büchner B., Podlesnyak A., Russina M., Furrer A., Strässle Th., Pomjakushina E., Conder K., Khomskii D.I.: Origin of a spin-state polaron in lightly hole doped LaCoO₃. *J. Phys.: Conf. Ser.* **150**, 42003(1-4) (2009)
5. Andrianov V.V., Epstein O.I., Gainutdinova T.Kh., Shtark M.B., Timoshenko A.Kh., Gainutdinov Kh.L.: Antibodies to calcium-binding S100 protein block the conditioning of long-term sensitization in the terrestrial snail. *Pharmacology, Biochem. Behav.* **94**, iss. 1, 37–42 (2009)
6. Augustyniak-Jablokow M.A., Yablokov Yu.V., Sukhanov A.A., Kurzeja L., Tadyszak K., Voronkova V.K.: EPR study of polypropylene and polyethylene composites with shugite and anthracite. *KARBO no. 2*, 83–90 (2009)
7. Bayazitov R.M.: Heating and photoionization of silicon structures at laser treatments. *Proc. 17 IEEE Int. Conf.*

* Статьи, опубликованные в сборнике "Казанский физико-технический институт имени Е. К. Завойского 2009. Ежегодник", не приводятся.

- on Advanced Thermal Processing of Semiconductors (RTP 2009), pp. 109–112. Piscataway, NJ: IEEE 2009.
8. Bayazitov R.M., Batalov R.I.: Formation of Si-based light-emitting structures by ion implantation and pulsed treatments. Proc. 17 IEEE Int. Conf. on Advanced Thermal Processing of Semiconductors (RTP 2009), pp. 97–100. Piscataway, NJ: IEEE 2009.
9. Buongiorno J., Venerus D.C., Prabhat N., McKrell Th., Townsend J., Christianson R., Tolmachev Yu.V., Kebinski P., Hu L.-W., Alvarado J.L., Bang I.C., Bishnoi S.W., Bonetti M., Botz F., Cecere A., Chang Y., Chen G., Chen H., Chung S.J., Chyu M.K., Das S.K., Paola R.D., Ding Yu., Dubois F., Dzido G., Eapen J., Escher W., Funfschilling D., Galand Q., Gao J., Gharagozloo P.E., Goodson K.E., Gutierrez J.G., Hong H., Horton M., Hwang K.S., Iorio C.S., Jang S.P., Jarzebski A.B., Jiang Y., Jin L., Kabelac S., Kamath A., Kedzierski M.A., Kieng L.G., Kim Ch., Kim J.-H., Kim S., Lee S.H., Leong K.Ch., Manna I., Michel B., Ni R., Patel H.E., Philip J., Poulikakos D., Reynaud C., Savino R., Singh P.K., Song P., Sundararajan T., Timofeeva E., Tritcak T., Turanov A.N., Vaerenbergh S.V., Wen D., Witharana S., Yang C., Yeh W.-H., Zhao X.-Zh., Zhou Sh.-Q.: A benchmark study on the thermal conductivity of nanofluids. *J. Appl. Phys.* **106**, 094312(1-14) (2009)
10. Doğan N., Topkaya R., Subaşı H., Yerli Y., Rameev B.: Development of Halbach magnet for portable NMR device. *J. Phys.: Conf. Ser.* **153**, 012047(1-8) (2009)
11. Falin M.L., Anikeenok O.A., Latypov V.A., Khaidukov N.M., Callens F., Vrielinck H., Hoefstaetter A.: Transferred hyperfine interactions for Yb^{3+} ions in CsCaF_3 and Cs_2NaYF_6 single crystals: experimental and ab initio study. *Phys. Rev. B* **80**, 174110(1-11) (2009)
12. Galeev A.A., Vinokurov V.M., Mouraviev F.A., Osin Yu.N.: EPR and SEM study of organo-mineral associations in lower permian evaporite dolomites. *Appl. Magn. Reson.* **35**, no. 3, 473–479 (2009)
13. Galkin N.G., Galkin K.N., Chusovitin E.A., Vavanova S.V., Maslov A.M., Goroshko D.L., Polyarnyi V.O., Bayazitov R.M., Batalov R.I., Ivlev G.D.: The morphology and optical properties of Fe, Cr and Mg silicide nanocrystallites buried in silicon by ion implantation, pulsed treatments and Si overgrowth. Proc. of Int. Conf. “Nanomeeting-2009” (Borisenko V.E., Gaponenko S.V., Gurin V.S., eds.), pp. 100–103. Singapore: World Sci. Publishing Company 2009.
14. Garifullin I.A.: EPR study of superconductions. “Electron Paramagnetic Resonance: From Fundamental Research to Pioneering Applications & Zavoisky Award”. “The Treasures of Eureka” (Salikhov K.M., sci. ed.), vol. 1, pp. 114–115. Wellington, New Zealand: AXAS Publishing Ltd. 2009.
15. Güler S., Rameev B., Khaibullin R.I., Lopatin O.N., Aktaş B.: EPR study of Mn-implanted single crystal TiO_2 . *J. Phys.: Conf. Ser.* **153**, 012052(1-6) (2009)
16. Gumarov G.G., Petukhov V.Yu., Bukharaev A.A., Biziaev D.A., Nuzhdin V.I., Khaibullin R.I.: Formation of dendrite structure at ion beam synthesis in external magnetic field. *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. Sect. B* **267**, iss. 8-9, 1307–1310 (2009)
17. Gumarov G.G., Petukhov V.Yu., Zhikharev V.A., Valeev V.F., Khaibullin R.I.: Investigation of magnetic anisotropy of silicide films ion-beam synthesized in external magnetic field. *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. Sect. B* **267**, iss. 8-9, 1600–1603 (2009)
18. Inushima T., Mamin R.F., Shiomi H.: Impurity band structure of boron-doped homoepitaxial diamond. *Phys. Rev. B* **79**, no. 3, 045210(1-6) (2009)
19. Ivanin K.V., Leontyev A.V., Lobkov V.S., Nikiforov V.G., Salikhov K.M., Samartsev V.V., Safiullin G.M.: Femtosecond four-wave mixing spectroscopy on CdS crystal at room temperature. *Laser Phys. Lett.* **6**, no. 9, 644–646 (2009)
20. Ivanshin V.A., Sukhanov A.A., Sokolov D.A., Aronson M.C., Jia S., Bud’ko S.L., Canfield P.C.: Electron spin resonance of dense Yb-based heavy-fermion compounds: new experimental data. *J. Alloys and Compounds* **480**, 126–127 (2009)
21. Kalashnikov D.A., Karassiov V.P., Katamadze K.G., Soloviev A.A., Prudkovsky P.A., Kulik S.P.: Generation of polarization entangled states in spatially inhomogeneous ferroelectrics. *Adv. Sci. Lett.* **2**, 430–447 (2009)
22. Kandrashkin Yu.E., Salikhov K.M.: Numerical simulation of quantum teleportation across biological membrane in photosynthetic reaction centers. *Appl. Magn. Reson.* **37**, no. 1-4, 549–566 (2009)
23. Kataev V.: Magnetic resonance in low-dimensional quantum spin systems. “Electron Paramagnetic Resonance: From Fundamental Research to Pioneering Applications & Zavoisky Award”. “The Treasures of Eureka” (Salikhov K.M., sci. ed.), vol. 1, pp. 116–117. Wellington, New Zealand: AXAS Publishing Ltd. 2009.
24. Kataev V., Yehia M., Vavilova E., Büchner B., Möller A., Taetz T., Hollmann N., Mydosh J.A.: Interplay between structure, transport and magnetism in the frustrated $S = 1/2$ system In_2VO_5 . *J. Phys.: Conf. Ser.* **150**, 42084(1-4) (2009)
25. Krushelnitsky A., Zinkevich T., Mukhametshina N., Tarasova N., Gogolev Y., Gnezdilov O., Fedotov V., Belton P., Reichert D.: ^{13}C and ^{15}N NMR study of hydration response of T4 lysozyme and αB -crystallin internal dynamics. *J. Phys. Chem. B* **113**, 10022–10034 (2009)
26. Leksin P.V., Salikhov R.I., Garifullin I.A., Vinzelberg H., Kataev V.E., Klingeler R., Tagirov L.R., Büchner B.: Observation of the “inverse” spin valve effect in Ni/V/Ni trilayer system. *Письма в ЖЭТФ* **90**, вып. 1-2, 64–68 (2009)
27. Mackova A., Bocan J., Khaibullin R.I., Valeev V.F., Slepicka P., Sajdl P., Svorcik V.: Characterization of Ni^{+} implanted PEEK, PET and PI. *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. Sect. B* **267**, iss. 8-9, 1549–1552 (2009)
28. Mamin R.F., Bdikin I.K., Kholkin A.L.: Locally induced charged states in $\text{La}_{0.89}\text{Sr}_{0.11}\text{MnO}_3$ single crystals. *Appl. Phys. Lett.* **94**, 222901(1-3) (2009)

29. Moiseev S.A., Kamli A.A., Sanders B.C.: Low-loss nonlinear polaritonics (ArXiv, 0911.1372 quant/ph.) (2009)
30. Moiseev S.A., Tittel W.: Optical quantum memory with generalized time-reversible atom-light interactions (0812.1730v2, quant/ph.) (2009)
31. Najim F.A., Lukashevich M.G., Khaibullin R.I., Nuzhdin V.I., Odzhaev V.B.: DC and AC electric characterization of PI foils implanted by Cu ions. Сб. науч. тр. IV Междунар. науч. конф. "Актуальные проблемы физики твёрдого тела" (ФТТ-2009), 20–23 октября 2009, т. 2, с. 110–112. Минск 2009.
32. Nurgazizov N., Zhdan P., Kisielewski M., Stobiecki F.: Investigation of magnetization distribution in Co/Au multilayer film by magnetic force microscopy. *Solid State Phenomena* **152-153**, 277–280 (2009)
33. Odeurs J., Hoy G.R., Rostovtsev Yu., Shakhmuratov R.N.: Towards more relaxed conditions for a gamma-ray laser: methods to realize induced transparency for nuclear resonant gamma radiation. *Laser & Photon Rev.* (DOI 10.1002/lpor.200810068) (2009)
34. Petrushkin S.V., Samartsev V.V.: Advances of laser refrigeration in solids. *Laser Phys.* (DOI 10.1134/S1054660X09170162) (2009)
35. Popa A.I., Vavilova E., Arango Y.C., Kataev V., Täschner C., Klauss H.-H., Maeter H., Luetkens H., Büchner B., Klingeler R.: High temperature ferromagnetism of Li-doped vanadium oxide nanotubes. *EPL* **88**, 57002(1-5) (2009)
36. Safiullin G.M., Nikiforov V.G., Lobkov V.S., Samartsev V.V., Leontiev A.V.: Femtosecond echo-processing in a dye-doped polymer film at room temperature. *Laser Phys. Lett.* **6**, no. 10, 746–752 (2009)
37. Salikhov K.M.: Basics of the electron paramagnetic resonance spectroscopy. "Electron Paramagnetic Resonance: From Fundamental Research to Pioneering Applications & Zavoisky Award". "The Treasures of Eureka" (Salikhov K.M., sci. ed.), vol. 1, pp. 34–57. Wellington, New Zealand: AXAS Publishing Ltd. 2009.
38. Salikhov K.M.: E. K. Zavoisky – the pioneer of the EPR spectroscopy. "Electron Paramagnetic Resonance: From Fundamental Research to Pioneering Applications & Zavoisky Award". "The Treasures of Eureka" (Salikhov K.M., sci. ed.), vol. 1, p. 23. Wellington, New Zealand: AXAS Publishing Ltd. 2009.
39. Salikhov K.M.: EPR from the bird's eye view. "Electron Paramagnetic Resonance: From Fundamental Research to Pioneering Applications & Zavoisky Award". "The Treasures of Eureka" (Salikhov K.M., sci. ed.), vol. 1, pp. 29–31. Wellington, New Zealand: AXAS Publishing Ltd. 2009.
40. Salikhov K.M.: EPR is the key to quantum computers on electron spins. "Electron Paramagnetic Resonance: From Fundamental Research to Pioneering Applications & Zavoisky Award". "The Treasures of Eureka" (Salikhov K.M., sci. ed.), vol. 1, pp. 130–131. Wellington, New Zealand: AXAS Publishing Ltd. 2009.
41. Salikhov K.M.: Modern development of magnetic resonance (Zavoisky 100). *Appl. Magn. Reson.* **35**, no. 3, 361–362 (2009)
42. Salikhov K.M.: Pioneering applications of EPR spectroscopy. "Electron Paramagnetic Resonance: From Fundamental Research to Pioneering Applications & Zavoisky Award". "The Treasures of Eureka" (Salikhov K.M., sci. ed.), vol. 1, pp. 110–111. Wellington, New Zealand: AXAS Publishing Ltd. 2009.
43. Salikhov K.M.: Quantum teleportation. On the way to resolution of major quantum computing problems. "Electron Paramagnetic Resonance: From Fundamental Research to Pioneering Applications & Zavoisky Award". "The Treasures of Eureka" (Salikhov K.M., sci. ed.), vol. 1, pp. 132–133. Wellington, New Zealand: AXAS Publishing Ltd. 2009.
44. Salikhov K.M.: Zavoisky award. The international Zavoisky award is established to recognize truly outstanding applications or developments of electron paramagnetic resonance in any field of science. "Electron Paramagnetic Resonance: From Fundamental Research to Pioneering Applications & Zavoisky Award". "The Treasures of Eureka" (Salikhov K.M., sci. ed.), vol. 1, pp. 60–64. Wellington, New Zealand: AXAS Publishing Ltd. 2009.
45. Salikhov R.I., Garifullin I.A., Garif'yanov N.N., Tagirov L.R., Theis-Bröhl K., Westerholt K., Zabel H.: Experimental observation of the spin screening effect in superconductor/ferromagnet thin film heterostructures. *Phys. Rev. Lett.* **102**, 087003(1-4) (2009)
46. Salikhov R.I., Garif'yanov N.N., Garifullin I.A., Tagirov L.R., Westerholt K., Zabel H.: Study of the spin screening effect in superconductor/ferromagnet thin film heterostructures by nuclear magnetic resonance. *Phys. Rev. B* **80**, iss. 21, 214523(1-8) (2009)
47. Schmidt E.V., Ermakov V.L., Gnezdilov O.I., Matukhin V.L., Korzun B.V., Fadeeva A.A., Khabibullin I.Kh.: Structural investigation of non-stoichiometric CuInS₂ by ⁶⁵Cu and ¹¹⁵In nuclear magnetic resonance. *J. Appl. Spectroscopy* **76**, no. 5, 667–671 (2009)
48. Shakhmuratov R.N., Vagizov F., Odeurs J., Kocharovskaya O.: Slow gamma-photon with a doublet structure: time delay via a transition from destructive to constructive interference of collectively scattered radiation with the incoming photon. *Phys. Rev. A* **80**, iss. 6, 063805(1-15) (2009)
49. Silant'eva D.I., Gainutdinova T.Kh., Andrianov V.V., Gainutdinov Kh.L.: Electrophysiological studies of the effects of chronic administration of caffeine on the formation of a conditioned defensive reflex in the common snail. *Neurosci., Behav. Physiol.* **39**, no. 4, 403–407 (2009)
50. Stoikov I.I., Yushkova E.A., Bukharaev A.A., Biziaev D.A., Zharov I.: Self-assembly of stereoisomers of p-tert-butyl thiacalix[4]arenes tetrasubstituted at the lower rim by a tertiary amide group with cations of p- and d-elements in the organic phase. *J. Phys. Chem. C* **113**, 15838–15844 (2009)

51. Sukhanov A., Galeev R., Mingalieva L., Voronkova V.K., Gheorge R., Andruh M.: EPR investigation of the spin-spin interactions in a Cu(II)-Gd(III)-Fe(III) heterospin system. *Appl. Magn. Reson.* **35**, no. 4, 613–623 (2009)
52. Swartz H.M., Khan N., Williams B.B., Hartford A.C., Zaki R.I., Ernstoff M.S., Buckley J.C., Gubaidullin F.F., Hou H., Lesniewski P., Kmiec M., Grinberg O.Y., Sucheta A., Walczak T.: Clinical applications of in vivo EPR: EPR oximetry. “Electron Paramagnetic Resonance: From Fundamental Research to Pioneering Applications & Zavoisky Award”. “The Treasures of Eureka” (Salikhov K.M., sci. ed.), vol. 1, pp. 178–179. Wellington, New Zealand: AXAS Publishing Ltd. 2009.
53. Tarasov V., Shakurov G.: EPR spectroscopy of impurity ions in dielectric crystals. “Electron Paramagnetic Resonance: From Fundamental Research to Pioneering Applications & Zavoisky Award”. “The Treasures of Eureka” (Salikhov K.M., sci. ed.), vol. 1, pp. 124–125. Wellington, New Zealand: AXAS Publishing Ltd. 2009.
54. Tittel W., Afzelius M., Chanelière T., Cone R.L., Kröll S., Moiseev S.A., Sellars M.: Photon-echo quantum memory in solid state systems. *Laser & Photon Rev.* **3**, 1–24 (2009)
55. Tseitlin M.P., Iyudin V.S., Tseitlin O.A.: Advantages of digital phase-sensitive detection for upgrading an obsolete CW EPR spectrometer. *Appl. Magn. Reson.* **35**, no. 4, 569–580 (2009)
56. Tseitlin M.P., Tseitlin O.A.: Using of digital demodulation of multiharmonic overmodulated EPR signals to improve EPR oximetry reliability. *Appl. Magn. Reson.* **36**, no. 1, 25–34 (2009)
57. Turanov A.N., Tolmachev Yu.V.: Heat- and mass-transport in aqueous silica nanofluids. *Heat Mass Transfer.* **45**, 1583–1588 (2009)
58. Vavilova E., Moskvina A.S., Arango Y.C., Sotnikov A., Drechsler S.-L., Klingeler R., Volkova O., Vasiliev A., Kataev V., Büchner B.: Quantum electric dipole glass and frustrated magnetism near a critical point in $\text{Li}_2\text{ZrCuO}_4$. *EPL* **88**, 27001(1-6) (2009)
59. Vishnevskaya G.P., Frolova E.N.: EPR of metal complexes in ionites. “Electron Paramagnetic Resonance: From Fundamental Research to Pioneering Applications & Zavoisky Award”. “The Treasures of Eureka” (Salikhov K.M., sci. ed.), vol. 1, pp. 126–127. Wellington, New Zealand: AXAS Publishing Ltd. 2009.
60. Voronkova V.K.: EPR study of clusters. “Electron Paramagnetic Resonance: From Fundamental Research to Pioneering Applications & Zavoisky Award”. “The Treasures of Eureka” (Salikhov K.M., sci. ed.), vol. 1, pp. 136–137. Wellington, New Zealand: AXAS Publishing Ltd. 2009.
61. Walter A., Amari A., Kröll S., Kalachev A.A.: Experimental superradiance and slow-light effects for quantum memories. *Phys. Rev. A* **80**, iss. 1, 012317(1-7) (2009)
62. Yilgin R., Kazan S., Rameev B., Aktaş B., Westerholt K.: FMR studies of half metallic ferromagnetic thin films Co_2MnSn and Co_2MnGe . *J. Phys.: Conf. Ser.* **153**, 012068(1-4) (2009)
63. Арсланов Н.М., Моисеев С.А., Камили А.: Магнитное поле на оптических частотах в метаматериалах. Сб. ст. XIII Междунар. молодёжной науч. школы “Когерентная оптика и оптическая спектроскопия” (Салахов М.Х., ред.), 26–28 октября 2009, вып. XIII, с. 117–121. Казань: КГУ 2009.
64. Базаров В.В., Сулейманов Н.М., Тогулев П.Н., Осин Ю.Н.: Исследование микроструктуры и сверхпроводящих свойств ультрадисперсных композитов $\text{MgB}_2\text{-Ti}$, $\text{MgB}_2\text{-Ni}$, $\text{MgB}_2\text{-Co}$. Перспективные материалы **7**, 28–32 (2009)
65. Байсупова Э.Р., Аминова Р.М., Савостина Л.И.: Квантовохимические расчёты химических сдвигов ядра ^{31}P в кластерах бетаина и фосфина. Учёт влияния растворителя. Сб. материалов конф. молодых учёных КФТИ КазНЦ РАН. Казань, 23 марта 2009, с. 14–20. Казань: ЗАО “Новое знание” 2009.
66. Байсупова Э.Р., Аминова Р.М.: К вопросу о влиянии эффектов растворителя на структуру и магнитные характеристики молекулярных кластеров. Сб. материалов конф. молодых учёных КФТИ КазНЦ РАН. Казань, 23 марта 2009, с. 41–47. Казань: ЗАО “Новое знание” 2009.
67. Бакиров М.М., Суханов А.А.: Электронный парамагнитный резонанс четырёхядерных кластеров Fe_2Y_2 и Fe_2Pr_2 . Сб. материалов конф. молодых учёных КФТИ КазНЦ РАН. Казань, 23 марта 2009, с. 48–53. Казань: ЗАО “Новое знание” 2009.
68. Балакин В.Е., Фаттахов Я.В., Гилязутдинов И.А., Салихов К.М., Юсупова Л.Р., Панов В.О., Хафизов Р.Т., Арсланов А.Р., Сахапова Л.Р., Лутфуллин Р.М.: Изучение эффективности визуализации онкологических и сосудистых заболеваний с применением контрастных веществ на низкополевых томографах. Материалы III Всерос. нац. конгресса лучевых диагностов и терапевтов “Радиология-2009”. Медицинская визуализация. Спец. вып., с. 50–51. М.: Видар 2009.
69. Баталов Р.И., Баязитов Р.М., Крыжков Д.И., Гайдук П.И., Гацкевич Е.И., Ивлёв Г.Д., Маркуш К.П., Алвеш Э.: Фазовые переходы в кремнии, имплантированном эрбием, при воздействии лазерного излучения. Журн. прикл. спектроскопии **76**, № 2, 225–231 (2009)
70. Баталов Р.И., Баязитов Р.М., Новиков Г.А., Шустов В.А., Осин Ю.Н., Шляхова А.Г.: Образование силицидов в системе Fe/Si под действием импульсных излучений. Хим. физика и мезоскопия **11**, № 4, 452–458 (2009)
71. Баталов Р.И., Баязитов Р.М., Нурутдинов Р.М., Крыжков Д.И., Гайдук П.И., Маркуш К.П., Алвеш Э.: Особенности импульсной обработки слоёв кремния, имплантированных ионами эрбия. Поверхность, синхротронные и нейронные исслед. № 8, 40–44 (2009)
72. Богданова Х.Г., Булатов А.Р., Голенищев-Кутузов В.А., Потапов А.А.: Трансформация акустической

- моды вблизи структурного и магнитного фазовых переходов в кристалле $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($x = 0.175$). Изв. РАН. Сер. физ. **73**, № 8, 1080–1082 (2009)
73. Бородин П.А., Бухараев А.А., Филатов Д.О., Воронцов Д.А., Лапшина М.А.: Визуализация локальной плотности состояний в квантовых точках InAs/GaAs методом комбинированной СТМ/АСМ. Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исслед. № 9, 71–75 (2009)
 74. Бринкевич Д.И., Вабищевич С.А., Валеев В.Ф., Волобуев В.С., Нажим Ф.А., Лукашевич М.Г., Хайбуллин Р.И., Оджаев В.Б.: Модификация приповерхностных слоёв полиэтилентерефталата и полиимида имплантацией ионов никеля. Материалы VIII Междунар. конф. “Взаимодействие излучений с твёрдым телом”, с. 148–150. Минск: БГУ 2009.
 75. Волобуев В.С., Бумай Ю.А., Лукашевич М.Г., Нажим Ф.А., Нуждин В.И., Хайбуллин Р.И., Оджаев В.Б.: Оптические характеристики металлополимерных композитов, синтезированных имплантацией серебра в ПЭТ и ПИ. Сб. науч. тр. IV Междунар. науч. конф. “Актуальные проблемы физики твёрдого тела” (ФТТ-2009), 20–23 октября 2009, т. 3, с. 306–308. Минск: Издатель Вараксин А.Н. 2009.
 76. Воробьёва В.Е., Калачёв А.А., Самарцев В.В.: Стимулированное фотонное эхо с временным кодированием данных в режиме Хопфилда-Литтла. Изв. РАН. Сер. физ. **73**, № 12, 1763–1767 (2009)
 77. Габидуллин Д.Д., Биктимиров Э.Ф.: Разработка опытного образца синтезатора радиочастот для сверхнизкополевого медицинского магнитно-резонансного томографа ТМР-0.06-КФТИ. Сб. материалов конф. молодых учёных КФТИ КазНЦ РАН. Казань, 23 марта 2009, с. 54–60. Казань: ЗАО “Новое знание” 2009.
 78. Гаврилова С.А., Голубева А.В., Андрианов В.В., Гайнутдинова Т.Х., Июдин В.С., Тимошенко А.Х., Яфарова Г.Г., Бычкова Е.Ю., Гайнутдинов Х.Л., Кошелев В.Б.: Изменение содержания оксида азота в мозге крыс в процессе развития фокального ишемического инсульта. Сб. тр. Междунар. науч. конф. “Закономерности развития патологических состояний и их коррекция”, 27–28 октября 2009, с. 43–46. Минск: Изд-во ПЧУП “Бизнесофсет” 2009.
 79. Гайнутдинов Х.Л., Гаврилова С.А., Голубева А.В., Давыдова М.П., Яфарова Г.Г., Андрианов В.В., Гайнутдинова Т.Х., Июдин В.С., Тимошенко А.Х., Кошелев В.Б.: Изменение интенсивности продукции оксида азота в отделах мозга и в крови крыс после ишемического инсульта: исследование методом ЭПР-спектроскопии. Сб. тр. Междунар. науч. конф. “Закономерности развития патологических состояний и их коррекция”, 27–28 октября 2009, с. 51–54. Минск: Изд-во ПЧУП “Бизнесофсет” 2009.
 80. Галкина И.В., Бердников Е.А., Гнездилов О.И., Тудрий Е.В., Ильясов А.В., Галкин В.И.: ЯМР-спектральное исследование реакции фосфорилирования дихлординитробензофураксана трифенилфосфином. Учён. зап. КГУ. Сер. “Естественные науки”, т. 151, кн. 3, с. 36–46 (2009)
 81. Галютдинов М.Ф., Фаррахов Б.Ф., Фаттахов Я.В., Захаров М.В.: Динамическая термометрия твёрдого тела методом оптической дифракции при импульсном облучении. Оптика и спектроскопия **107**, № 4, 675–679 (2009)
 82. Галютдинов М.Ф., Фаррахов Б.Ф., Фаттахов Я.В., Захаров М.В.: Методика лазерной диагностики структурно-фазовых превращений на поверхности полупроводников. Сб. ст. XIII Междунар. молодёжной науч. школы “Когерентная оптика и оптическая спектроскопия” (Салахов М.Х., ред.), 26–28 октября 2009, вып. XIII, с. 265–268. Казань: КГУ 2009.
 83. Галютдинов М.Ф., Фаррахов Б.Ф., Фаттахов Я.В., Захаров М.В.: Определение температуры тела методом оптической дифракции при импульсном нагреве. Сб. материалов конф. молодых учёных КФТИ КазНЦ РАН. Казань, 23 марта 2009, с. 76–82. Казань: ЗАО “Новое знание” 2009.
 84. Гатиятов Р.Г., Лисин В.Н., Бухараев А.А.: Нелинейный транспорт электронов в наноконтактах металлов при комнатной температуре. Сб. тез. Второго междунар. конкурса науч. работ молодых учёных в области нанотехнологий, 6–8 октября 2009, с. 30–32. Москва 2009.
 85. Гафиятуллин Н.М., Биктимиров Э.Ф.: Устройство для магнитно-резонансного томографа, позволяющее получать изображения наклонных слоёв. Сб. материалов конф. молодых учёных КФТИ КазНЦ РАН. Казань, 23 марта 2009, с. 61–67. Казань: ЗАО “Новое знание” 2009.
 86. Герасимов К.И., Фалин М.Л.: Магнитооптическая спектроскопия и оптическое детектирование ЭПР парамагнитных центров Yb^{3+} кубической симметрии в монокристаллах MeF_2 ($\text{Me} = \text{Cd}, \text{Ca}, \text{Pb}$). ФТТ **51**, вып. 4, 681–685 (2009)
 87. Герасимов К.И., Фалин М.Л.: Оптическая спектроскопия кластеров Yb^{3+} в монокристаллах SrF_2 . Материалы XV Всерос. конф. “Оптика и спектроскопия конденсированных сред”, с. 152–155. Краснодар: Кубанский гос. ун-т 2009.
 88. Голубев А.Н., Никитин С.И., Степанов А.Л.: Нелинейное оптическое поглощение наночастиц меди в кварцевом стекле. Сб. ст. XIII Междунар. молодёжной науч. школы “Когерентная оптика и оптическая спектроскопия” (Салахов М.Х., ред.), 26–28 октября 2009, вып. XIII, с. 162–165. Казань: КГУ 2009.
 89. Горошко Д.Л., Галкин Н.Г., Галкин К.Н., Ваванова С.В., Петрушкин И.А., Маслов А.М., Баталов Р.И., Баязитов Р.М.: Рост и оптические свойства гетероструктур $\text{Si}/\text{CrSi}_2/\text{Si}$ со встроенными преципитатами CrSi_2 : влияние ионной имплантации, импульсного ионного отжига и молекулярно-лучевой эпитаксии. Сб. тр. XII Межрегион. конф. молодых учёных по физике полупроводниковых, диэлектрических и маг-

- нитных материалов, с. 69–78. Владивосток: Дальнаука 2009.
90. Домрачева Н.Е., Морозов В.И., Груздев М.С., Манапов Р.А., Пятаев А.В.: Железосодержащие жидкокристаллические дендримеры и их свойства. Сб. ст. XVI Всерос. конф. “Структура и динамика молекулярных систем”. Электрон. журн. (www.ksu.ru/sdms/6_2009) № 6, часть А, с. 3–13. Казань: Инженерный центр МР и КГУ 2009.
91. Дубровский В.С., Чухвичёв В.Д., Мурзакаев В.М., Губайдуллин Ф.Ф.: Новые возможности ЯМК в условиях применения облегчённых типов промывочной жидкости. Науч.-техн. вестн. “Каротажник” № 8, 17–24 (2009)
92. Дулов Е.Н., Ивойлов Н.Г., Хрипунов Д.М., Тагиров Л.Р., Хайбуллин Р.И., Валеев В.Ф., Нуждин В.И.: Мёссбауэровские исследования магнитного фазового состава монокристаллического рутила (TiO_2), имплантированного ионами железа. Письма в ЖТФ 35, вып. 11, 1–9 (2009)
93. Ерёмина Р.М., Ерёмин М.В.: О соотношении между частотами магнитного резонанса и главными значениями тензора магнитной восприимчивости в кристаллах с низкой симметрией. Сб. тр. XXI Междунар. конф. “Новое в магнетизме и магнитных материалах”, 28 июня–4 июля 2009, с. 994–996. М.: МГУ 2009.
94. Ефимова И.Г., Зиганшин М.А., Горбачук В.В., Солдатов Д.В., Зиганшина С.А., Чукланов А.П., Бухараев А.А.: Образование nanoостровков на поверхности тонких плёнок дипептидов под действием паров органических соединений. Физикохимия поверхности и защита материалов 45, № 5, 474–477 (2009)
95. Зарипова А.Р., Камалов Т.А., Спиридонова Р.Р., Галибеев С.С., Гнездилов О.И.: Взаимодействие 3-хлорфенилизоцианата с рядом N-замещённых лактамов. Вестн. Казан. технол. ун-та № 3, 57–61 (2009)
96. Зиганшина С.А., Бухараев А.А., Шамсетдинова Л.И., Чукланов А.П., Бизяев Д.А.: Атомно-силовая микроскопия наночастиц кобальта с электрокаталитическими свойствами. Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исслед. № 9, 76–81 (2009)
97. Зуйков В.А., Калачёв А.А., Каримуллин К.Р., Самарцев В.В., Тиранов А.Д.: Особенности формирования сигналов фотонного эха в условиях сильного концентрационного тушения. Тр. XII Всерос. школы-семинара “Физика и применение микроволн”, вып. XII, ч. 4, с. 16–18. М.: МГУ 2009.
98. Зуйков В.А., Калачёв А.А., Каримуллин К.Р., Самарцев В.В., Тиранов А.Д.: Формирование сигналов фотонного эха в условиях сильного концентрационного тушения. Изв. РАН. Сер. физ. 73, № 12, 1780–1784 (2009)
99. Ибрагимов Ш.З., Чернов И.Ю., Осин Ю.Н.: Природа высоких значений анизотропии магнитной восприимчивости образцов горных пород с многодоменными ферромагнетиками. Физика Земли № 7, 63–77 (2009)
100. Ибрагимов М.И., Чушников А.И., Моисеев В.Н., Петухов В.Ю., Жеглов Е.П.: Возможности метода ЭПР для диагностики онкоурологической патологии. Электрон. журн. (oncology.ru), с. 50–51 (2009)
101. Иванин К.В., Леонтьев А.В., Лобков В.С., Никифоров В.Г., Сафиуллин Г.М., Самарцев В.В.: Фемтосекундная спектроскопия четырёхволнового смешения в кристалле CdS . Учён. зап. КГУ. Сер. “Физ.-мат. науки”, т. 151, кн. 1, с. 90–94 (2009)
102. Иваньшин В.А., Литвинова Т.О., Суханов А.А., Соколов Д.А., Аринзон М.К.: Электронный спиновый резонанс сплава Гейслера YbRh_2Pb . Письма в ЖЭТФ 90, вып. 2, 126–129 (2009)
103. Кабанов В.В., Мамин Р.Ф., Шапошникова Т.С.: Локализованные зарядовые неоднородности и фазовое расслоение вблизи фазового перехода второго рода. ЖЭТФ 135, вып. 2, 322–329 (2009)
104. Калачёв А.А., Петрова А.В.: Оптическое сверхизлучение на кооперативных переходах. Сб. ст. XIII Междунар. молодёжной науч. школы “Когерентная оптика и оптическая спектроскопия” (Салахов М.Х., ред.), 26–28 октября 2009, вып. XIII, с. 216–219. Казань: КГУ 2009.
105. Калашников Д.А., Карасёв В.П., Катамадзе К.Г., Кулик С.П., Соловьёв А.А.: Генерация произвольных частотно-перепутанных состояний двухфотонного света. ЖЭТФ 135, вып. 1, 40–50 (2009)
106. Калашников Д.А., Катамадзе К.Г., Кулик С.П.: Управление спектром двухфотонного поля: неоднородное уширение за счёт температурного градиента. Письма в ЖЭТФ 89, вып. 5, 264–269 (2009)
107. Каримуллин К.Р.: Исследование быстрой релаксационной динамики в аморфных примесных средах методом некогерентного фотонного эха. Сб. ст. XVI Всерос. конф. “Структура и динамика молекулярных систем”, вып. XVI, ч. 3, с. 240–243. Йошкар-Ола–Уфа–Казань–Москва: МарГТУ 2009.
108. Каримуллин К.Р.: Исследование динамики оптических спектров примесных центров в кристаллических и аморфных матрицах методами когерентного и некогерентного фотонного эха. Сб. ст. XIII Междунар. молодёжной науч. школы “Когерентная оптика и оптическая спектроскопия” (Салахов М.Х., ред.), 26–28 октября 2009, вып. XIII, с. 176–179. Казань: КГУ 2009.
109. Каримуллин К.Р.: К вопросу об определении параметров фазовой релаксации по спадам сигналов четырёхволнового смешения в спектроскопии примесных полимеров методом некогерентного фотонного эха. Материалы Четвёртой междунар. науч. школы “Наука и инновации-2009” (ISS “SI-2009”): Материалы Четвёртого междунар. науч. семинара “Фундаментальные исследования и инновации” и Всерос. молодёжного науч. семинара “Наука и инновации-2009” (Попов И.И., Козлов В.А., Самарцев В.В., Зинов В.Г., Яшин В.Г., ред.), с. 72–78. Йошкар-Ола: МарГУ 2009.

110. Каримуллин К.Р., Вайнер Ю.Г., Ерёмчев И.Ю., Наумов А.В.: Измерение давления методом микро-спектроскопии флуоресценции рубиновых зондов. Тр. XII Всерос. школы-семинара “Физика и применение микроволн”, вып. XII, ч. 4, с. 51–53. М.: МГУ 2009.
111. Каримуллин К.Р., Калачёв А.А., Зуйков В.А., Самарцев В.В.: Оптическая эхо-спектроскопия высококонцентрированного кристалла YAG:Tm³⁺. Учён. зап. КГУ. Сер. “Физ.-мат. науки”, т. 151, кн. 1, с. 111–120 (2009)
112. Клековкина В.В., Аминова Р.М., Савостина Л.И.: Применение методов функционала плотности и молекулярной динамики к изучению процессов взаимодействия триметилфосфина с CS₂ на поверхностях синглетного и триплетного состояний. Сб. материалов конф. молодых учёных КФТИ КазНЦ РАН. Казань, 23 марта 2009, с. 28–33. Казань: ЗАО “Новое знание” 2009.
113. Клековкина В.В., Аминова Р.М., Чачков Д.В.: Компьютерные расчёты свойств неорганических кристаллических материалов. Сб. материалов конф. молодых учёных КФТИ КазНЦ РАН. Казань, 23 марта 2009, с. 68–73. Казань: ЗАО “Новое знание” 2009.
114. Коновалов А.А., Тарасов В.Ф., Дудникова В.Б., Жариков Е.В.: Двух- и трёхвалентный хром в форстерите по данным высокочастотной ЭПР-спектроскопии. ФТТ **51**, вып. 8, 1533–1540 (2009)
115. Куковицкий Е.Ф., Шустов В.А., Львов С.Г., Осин Ю.Н., Мусатов А.Л., Израэльянц К.Р., Ормонт А.Б.: Углеродные нанотрубные автоэммиттеры с большой плотностью эмиссионного тока: синтез и эмиссионные характеристики. Нано-и микросистемная техника № 10, 5–9 (2009)
116. Лапаев Д.В., Никифоров В.Г., Сафиуллин Г.М., Галявиев И.Г., Джабаров В.И., Князев А.А., Лобков В.С., Галяметдинов Ю.Г.: Особенности межлигандного переноса энергии в мезогенном аддукте европия(III). Журн. структурной химии **50**, № 4, 809–815 (2009)
117. Латыпов И.З., Калинин А.А., Шкаликов А.В., Калачёв А.А., Самарцев В.В.: Генерация узкополосных коррелированных пар фотонов в процессе спонтанного параметрического рассеяния света в резонаторе. Изв. РАН. Сер. физ. **73**, № 12, 1768–1773 (2009)
118. Лебедев Д.В., Чукланов А.П., Бухараев А.А., Бизяев Д.В.: Влияние латеральных колебаний на формирование изображения в сканирующей зондовой микроскопии сдвиговых сил. Учён. зап. КГУ. Сер. “Физ.-мат. науки”, т. 150, кн. 2, с. 160–165 (2009)
119. Лебедев Д.В., Чукланов А.П., Бухараев А.А., Дружинина О.С.: Измерение модуля Юнга биологических объектов в жидкой среде с помощью специального зонда атомно-силового микроскопа. Письма в ЖТФ **35**, вып. 8, 54–61 (2009)
120. Лисин В.Н., Шегеда А.М.: Фото-фононная спектроскопия центров с произвольной оптической плотностью. Материалы XV Всерос. конф. “Оптика и спектроскопия конденсированных сред”, Краснодар, 20–26 сентября 2009, с. 199–201. Краснодар 2009.
121. Любимов В.Ю., Петрушенко Ю.Я., Попов Е.А., Самарцев В.В.: Эффекты квантовой интерференции гамма-излучения в “оптически” протяжённой среде. Учён. зап. КГУ. Сер. “Физ.-мат. науки”, т. 151, кн. 1, с. 121–129 (2009)
122. Мигачёв С.А., Садыков М.Ф., Иванов Д.А., Шакирзянов М.М.: Экспериментальная установка для исследования акустооптических явлений в магнитных материалах. Изв. ВУЗов. Проблемы энергетики № 7-8, 139–144 (2009)
123. Михайлов А.Е., Петрушкин С.В.: Температура и эффективность лазерного охлаждения кристаллов, легированных редкоземельными ионами. Сб. ст. XIII Междунар. молодёжной науч. школы “Когерентная оптика и оптическая спектроскопия” (Салахов М.Х., ред.), 26–28 октября 2009, вып. XIII, с. 312–315. Казань: КГУ 2009.
124. Моисеев С.А., Арсланов Н.М.: Многомодовая квантовая память на фотонном эхе в среде с “продольным” неоднородным уширением линии. Сб. ст. XIII Междунар. молодёжной науч. школы “Когерентная оптика и оптическая спектроскопия” (Салахов М.Х., ред.), 26–28 октября 2009, вып. XIII, с. 94–103. Казань: КГУ 2009.
125. Муранова Л.Н., Андрианов В.В., Гайнутдинов Х.Л.: Влияние нейролептика галоперидола, предшественника дофамина L-DOPA и нейротоксического аналога 6-OHDA, на выработку условного оборонительного рефлекса у виноградной улитки. Бюл. эксперим. биол. медицины **147**, № 11, 503–506 (2009)
126. Нажим Ф.А., Лукашевич М.Г., Базаров В.В., Хайбуллин Р.И., Оджаяев В.Б.: Магнитотранспортные характеристики полиимида, имплантированного ионами кобальта и меди. Материалы VIII Междунар. конф. “Взаимодействие излучений с твёрдым телом”, с. 186–188. Минск: БГУ 2009.
127. Насыров И.К., Валеева Д.Н., Осин Ю.Н., Халитов З.Я.: Диагностика многослойных углеродных нанотрубок “зигзаг” и “кресло” методом микродифракции электронов. Проблемы нелинейного анализа в инженерных системах **15**, вып. 1(31), 13–25 (2009)
128. Нефедьева К.Л., Калачёв А.А.: Частотно-угловой спектр спонтанного параметрического рассеяния в кристалле йодота лития. Сб. ст. XIII Междунар. молодёжной науч. школы “Когерентная оптика и оптическая спектроскопия” (Салахов М.Х., ред.), 26–28 октября 2009, вып. XIII, с. 204–207. Казань: КГУ 2009.
129. Никифоров В.Г., Лобков В.С.: Особенности либрационной динамики молекул бензонитрила и ортодихлорбензола в жидкости. Журн. структурной химии **50**, № 4, 824–829 (2009)

130. Овчинников И.В., Иванова Т.А., Туранов А.Н., Гарипов Р.Р.: ЭПР спин-переменных металломезогенов $[\text{FeL}_2]\text{X}$ ($\text{X} = \text{PF}_6, \text{SCN}$). ФТТ **51**, вып. 10, 1940–1945 (2009)
131. Осокин Д.Я., Хуснутдинов Р.Р.: Двухчастотный когерентный импульсный спектрометр ядерного квадрупольного резонанса. ПТЭ № 1, 96–100 (2009)
132. Петрушкин С.В., Самарцев В.В.: Оптическое охлаждение полимерных плёнок при испускании сигналов фотонного эха. Учён. зап. КГУ. Сер. “Физ.-мат. науки”, т. 151, кн. 1, с. 143–149 (2009)
133. Рахматуллина Д.Ф., Гордон Л.Х., Алябьев А.Ю., Огородникова Т.И., Лосева Н.Л., Обычный А.А.: Влияние NaNO_2 -источника монооксида азота на энергетический обмен растительных клеток. Докл. Акад. наук **424**, № 2, 283–285 (2009)
134. Ряснянский А.И., Палпант Б., Дебрус С., Пал У., Степанов А.Л.: Нелинейно-оптические свойства наночастиц золота, диспергированных в различных оптически прозрачных матрицах. ФТТ **51**, вып. 1, 52–56 (2009)
135. Самарцев В.В.: Когерентная оптическая спектроскопия примесных твёрдотельных сред. Сб. ст. “Оптическая спектроскопия и стандарты частоты” (Виноградов Е.А., ред.), с. 82–105. Томск: ИААО СО РАН 2009.
136. Самарцев В.В.: Твёрдотельные оптические экзопроцессоры. Материалы Четвёртой междунар. науч. школы “Наука и инновации-2009” (ISS “SI-2009”): Материалы Четвёртого междунар. науч. семинара “Фундаментальные исследования и инновации” и Всерос. молодёжного науч. семинара “Наука и инновации-2009” (Попов И.И., Козлов В.А., Самарцев В.В., Зинов В.Г., Яшин В.Г., ред.), с. 106–120. Йошкар-Ола: МарГУ 2009.
137. Сербиненко А.О., Калачёв А.А.: Бифотонная спектроскопия сверхизлучательного рассеяния света. Сб. ст. XIII Междунар. молодёжной науч. школы “Когерентная оптика и оптическая спектроскопия” (Салахов М.Х., ред.), 26–28 октября 2009, вып. XIII, с. 241–244. Казань: КГУ 2009.
138. Сербиненко В.О., Калачёв А.А.: Двухфотонное поглощение при распространении слабых импульсов света в протяжённых диспергирующих средах. Учён. зап. КГУ. Сер. “Физ.-мат. науки”, т. 151, кн. 1, с. 166–171 (2009)
139. Сидоров Ю.В., Гнездилов О.И., Бурков К.А., Усъяров О.Г.: Адсорбция гидролизированных ионов алюминия на силикагеле по данным спектроскопии ЯМР. Коллоидный журн. **71**, № 2, 262–266 (2009)
140. Степанов А.Л.: Нелинейно-оптические свойства в ближнем ИК-диапазоне метаматериалов на основе сапфира с наночастицами меди и серебра. Учён. зап. КГУ. Сер. “Физ.-мат. науки”, т. 151, кн. 1, с. 181–188 (2009)
141. Степанов А.Л.: Плазменная нанооптика. Сб. ст. XIII Междунар. молодёжной науч. школы “Когерентная оптика и оптическая спектроскопия” (Салахов М.Х., ред.), 26–28 октября 2009, вып. XIII, с. 71–77. Казань: КГУ 2009.
142. Степанов А.Л., Валеев В.Ф., Нуждин В.И., Базаров В.В., Файзрахманов И.А.: Отжиг эксимерным лазером силикатного стекла с ионно-синтезированными наночастицами серебра. ЖТФ **79**, вып. 10, 102–109 (2009)
143. Степанов А.Л., Валеев В.Ф., Нуждин В.И., Файзрахманов И.А.: Лазерный отжиг кварцевого стекла с ионно-синтезированными наночастицами меди. ФТТ **51**, вып. 9, 1801–1807 (2009)
144. Степанов А.Л., Валеев В.Ф., Осин Ю.Н., Нуждин В.И., Файзрахманов И.А.: Формирование наночастиц серебра при осаждении металла на эпоксидную смолу, находящуюся в вязко-текучем состоянии. ЖТФ **79**, вып. 7, 70–75 (2009)
145. Степанов А.Л., Крейбуг У., Рейнхольдт А., Файзрахманов И.А.: Синтез с использованием кластерных пучков наноструктурного иттрия и исследование оптических и электрических свойств иттриевых гидридных форм. ФТТ **51**, вып. 8, 1619–1625 (2009)
146. Степанов А.Л., Попок В.Н., Чичков Б.Н.: Нелинейные оптические свойства материалов с металлическими наночастицами. Материалы Четвёртой междунар. науч. школы “Наука и инновации-2009” (ISS “SI-2009”): Материалы Четвёртого междунар. науч. семинара “Фундаментальные исследования и инновации” и Всерос. молодёжного науч. семинара “Наука и инновации-2009” (Попов И.И., Козлов В.А., Самарцев В.В., Зинов В.Г., Яшин В.Г., ред.), с. 125–135. Йошкар-Ола: МарГУ 2009.
147. Степанов А.Л., Хайбуллин Р.И., Валеев В.Ф., Осин Ю.Н., Нуждин В.И., Файзрахманов И.А.: Ионный синтез наночастиц серебра в вязко-текучей эпоксидной смоле. ЖТФ **79**, вып. 8, 77–82 (2009)
148. Суханов А.А., Иваньшин В.А.: Магнетизм локального момента 3d-электронов в сравнении с кондосвойствами 4f-электронов в $\text{YbT}_2\text{Zn}_{20}$ ($T = \text{Co, Fe}$). Сб. материалов конф. молодых учёных КФТИ КазНЦ РАН. Казань, 23 марта 2009, с. 74–75. Казань: ЗАО “Новое знание” 2009.
149. Тагирова Р.Р., Тимошенко А.Х., Гайнутдинов Х.Л., Штарк М.Б., Эпштейн О.И.: Предшественник серотонина 5-окситриптофан нарушает протекторный эффект малых доз антител к белку S-100B при формировании долговременной сенситизации. Бюл. эксперим. биол. медицины **148**, прил. 8, 202–204 (2009)
150. Таланов Ю.И., Салахутдинов Л.Ф., Джианнини Е., Хасанов Р.И.: Обнаружение вихревых возмущений в кристалле $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ при температурах выше критической с помощью ЭПР поверхностного слоя. Письма в ЖЭТФ **90**, вып. 3, 222–226 (2009)
151. Тимошенко А.Х., Андрианов В.В., Гайнутдинова Т.Х., Гайнутдинов Х.Л., Муранова Л.Н., Тагирова Р.Р., Штарк М.Б., Эпштейн О.И.: Изменение элект-

- рических характеристик командных нейронов при протекторном эффекте антител к белку S100 на формирование долговременной сенситизации виноградной улитки. Бюл. эксперим. биол. медицины **147**, № 10, 399–403 (2009)
152. Тиранов А.Д., Каримуллин К.Р., Самарцев В.В.: Численное моделирование фотонного эха в двухуровневой среде. Учён. зап. КГУ. Сер. “Физ.-мат. науки”, т. 151, кн. 1, с. 197–203 (2009)
 153. Торгашев В.И., Жукова Е.С., Горшунов Б.П., Аксёнов Н.П., Прохоров А.С., Шакуров Г.С., Пестряков Е.В.: Терагерцовая ИК-спектроскопия молекул воды в структурных каналах берилла ($\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$). Тр. XII Междунар. симпоз. “Порядок, беспорядок и свойства оксидов” (Сахненко В.П., ред.), с. 182–184. Ростов-на-Дону 2009.
 154. Фалин М.Л., Латыпов В.А.: Лигандное сверхтонкое взаимодействие ионов Yb^{3+} в монокристаллах CsCaF_3 и Cs_2NaYF_6 . Материалы XV Всерос. конф. “Оптика и спектроскопия конденсированных сред”, с. 147–151. Краснодар: Кубанский гос. ун-т 2009.
 155. Фаттахова Ю.З., Калачёв А.А.: Особенности СПР от импульсной накачки в резонаторе. Сб. ст. XIII Междунар. молодёжной науч. школы “Когерентная оптика и оптическая спектроскопия” (Салахов М.Х., ред.), 26–28 октября 2009, вып. XIII, с. 316–319. Казань: КГУ 2009.
 156. Хабибуллин И.Х., Матухин В.Л., Ермаков В.Л., Гнездилов О.И., Корзун Б.В., Шмидт Е.В.: Исследование полупроводникового соединения CuInS_2 методами ядерного магнитного резонанса ^{63}Cu и ^{115}In . ФТП **43**, вып. 1, 3–6 (2009)
 157. Христофорова Д.А., Калачёв А.А.: Многоканальная обработка информации в режиме фотонного эха в условиях контролируемого неоднородного уширения оптического перехода. Учён. зап. КГУ. Сер. “Физ.-мат. науки”, т. 151, кн. 1, с. 204–209 (2009)
 158. Черников С.К., Русских И.В.: Комплекс программ для анализа динамики и прочности конструкции автомобиля на вычислительных кластерах. V Всерос. науч.-техн. конф. “Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики” (АНТЭ-09), с. 80–86. Казань: КГТУ им. А. Н. Туполева 2009.
 159. Черников С.К., Файзуллин А.М., Ахмадышин А.Н.: Имитационное моделирование при анализе безопасности конструкций грузовых автомобилей. V Всерос. науч.-техн. конф. “Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики” (АНТЭ-09), с. 91–96. Казань: КГТУ им. А. Н. Туполева 2009.
 160. Черников С.К., Хамзин А.Г.: Применение метода спектральных представлений в оценке эксплуатационных напряжений конструкций автомобилей. V Всерос. науч.-техн. конф. “Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики” (АНТЭ-09), с. 87–90. Казань: КГТУ им. А. Н. Туполева 2009.
 161. Чусовитин Е.А., Ваванова С.В., Петрушкин И.А., Галкин Н.Г., Баязитов Р.М., Баталов Р.И., Ивлёв Г.Д., Шамирзаев Т.С.: Влияние импульсного лазерного отжига на рост кремния и оптические свойства гетероструктуры $\text{Si}/\beta\text{-FeSi}_2/\text{Si}$, изготовленной методами ионной имплантации и молекулярно-лучевой эпитаксии. Хим. физика и мезоскопия **11**, № 3, 374–385 (2009)
 162. Шакуров Г.С., Аванесов А.Г., Аванесов С.А.: Высокочастотная перестраиваемая ЭПР-спектроскопия некрамерсовых ионов в кристаллах $\text{AgGaSe}_2:\text{Cr}$, $\text{AgGaS}_2:\text{Cr}$ и $\text{CdGa}_2\text{S}_4:\text{Cr}$. ФТТ **51**, вып. 11, 2160–2166 (2009)
 163. Шакуров Г.С., Аванесов А.Г., Аванесов С.А.: Тетрагональные и ромбические центры двухвалентного хрома в тройных полупроводниковых соединениях с решёткой халькопирита. Материалы XV Всерос. конф. “Оптика и спектроскопия конденсированных сред”, с. 115–118. Краснодар: Кубанский гос. ун-т 2009.
 164. Шакуров Г.С., Фазлижанов И.И., Шустов В.А., Охримчук А.Г., Личкова Н.В., Загороднев В.Н.: Исследование кристалла $\text{RbPb}_2\text{Cl}_5:\text{Bi}$ методом широкополосной ЭПР-спектроскопии. Материалы XV Всерос. конф. “Оптика и спектроскопия конденсированных сред”, с. 119–122. Краснодар: Кубанский гос. ун-т 2009.
 165. Шарипов К.Р., Ерёмина Р.М., Фазлижанов И.И., Пятаев А.В.: Исследование фазового разделения в керамике $\text{Eu}_{0.6}\text{La}_{0.4-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($x = 0.1; 0.13; 0.15; 0.17; 0.2; 0.3$) методом ЭПР. Сб. материалов конф. молодых учёных КФТИ КазНЦ РАН. Казань, 23 марта 2009, с. 83–90. Казань: ЗАО “Новое знание” 2009.
 166. Шкаликов А.В., Воронин А.Г.: Служение науке и Отечеству (к 70-летию со дня рождения В. В. Самарцева). Материалы Четвёртой междунар. науч. школы “Наука и инновации-2009” (ISS “SI-2009”): Материалы Четвёртого междунар. науч. семинара “Фундаментальные исследования и инновации” и Всерос. молодёжного науч. семинара “Наука и инновации-2009” (Попов И.И., Козлов В.А., Самарцев В.В., Зинов В.Г., Яшин В.Г., ред.), с. 342–343. Йошкар-Ола: МарГУ 2009.
 167. Эпштейн О.И., Сергеева С.А., Дугина Ю.Л., Андрианов В.В., Гайнутдинова Т.Х., Исмаилова А.И., Муранова Л.Н., Гайнутдинов Х.Л.: Эффекты предварительного введения препаратов галоперидола в малых дозах на действие галоперидола на поведенческие реакции и мембранный потенциал командных нейронов виноградной улитки. Бюл. эксперим. биол. медицины **147**, № 11, 507–510 (2009)

Защиты, награды, стипендии

Защита диссертаций

В 2009 году докторские диссертации защитили:

1. Воронкова Виолета Константиновна
ЭПР-спектроскопия спиновых кластеров и низкоразмерных систем, построенных из кластеров
01.04.11 “Физика магнитных явлений”
2. Домрачева Наталья Евгеньевна
Электронный парамагнитный резонанс металлокомплексов железа, хрома и меди
01.04.11 “Физика магнитных явлений”
3. Степанов Андрей Львович
Синтез и оптические свойства метаматериалов с металлическими наночастицами
01.04.05 “Оптика”
4. Шахмуратов Рустэм Назимович
Метод адиабатического описания интерференции состояний многоуровневых квантовых систем в резонансных полях излучения
01.04.05 “Оптика”

В 2009 году кандидатские диссертации защитили следующие сотрудники и аспиранты:

1. Зарипов Руслан Булатович
Применение эффектов модуляции электронного спинового эха для изучения неупорядоченных веществ, содержащих радикалы
01.04.11 “Физика магнитных явлений”
2. Калашников Дмитрий Андреевич
Пространственно-неоднородные источники бифотонных полей с контролируемыми спектральными и поляризационными свойствами
01.04.05 “Оптика”
3. Каримуллин Камиль Равкатович
Динамика оптических спектров примесных центров в кристаллических и аморфных матрицах: исследования методами когерентного и некогерентного фотонного эха
01.04.05 “Оптика”
4. Лапаев Дмитрий Викторович
Исследование процессов переноса энергии в мезогенном аддукте европия(III)
01.04.17 “Химическая физика, в том числе физика горения и взрыва”
5. Салихов Руслан Ильгизович
Экспериментальное обнаружение и исследование эффекта спинового экранирования в тонкоплёночных гетероструктурах сверхпроводник/ферромагнетик
01.04.11 “Физика магнитных явлений”
6. Суханов Андрей Анатольевич
Обменные взаимодействия и спиновая динамика в гетероструктурах и интерметаллидах на основе 3d- и 4d-ионов по данным ЭПР
01.04.11 “Физика магнитных явлений”

Научные стипендии

Персональная стипендия Немецкого научного фонда им. Александра фон Гумбольдта для проведения научных исследований по теме “Нелинейно-оптические свойства металлических наночастиц” в лазерном центре г. Ганновера (Германия) в 2009 году присуждена Степанову А.Л., к.ф.-м.н., с.н.с.

Награждения

Государственная премия РТ 2009 года в области науки и техники за цикл работ “Когерентные и коллективные явления в нелинейной и квантовой оптике” присуждена д.ф.-м.н., проф., зав. лабораторией В. В. Самарцеву

Лауреатами Международной премии им. Дж. Гиббонса Института инженеров электроники и электротехники (IEEE) 2009 года за вклад в технологию лазерного отжига полупроводников стали:

- член-корр. РАН, проф., д.ф.-м.н. И. Б. Хайбуллин (посмертно)
- д.ф.-м.н., зав. лабораторией Р. М. Баязитов
- к.ф.-м.н., зав. отделом и лабораторией Я. В. Фаттахов
- к.ф.-м.н., с.н.с. М. Ф. Галяутдинов
- к.ф.-м.н., н.с. Р. И. Баталов

Оптическое общество им. Д. С. Рождественского наградило за выдающиеся достижения в области физической оптики, голографии и её приложений медалью “Академика Ю. Н. Денисюка”:
Штыркова Е.И., д.ф.-м.н., проф., г.н.с.

Почётными грамотами Президиума РАН и Профсоюза работников РАН были отмечены:
Львов С.Г., н.с.
Сулейманов Н.М., д.ф.-м.н., в.н.с.
Шустов В.А., н.с.

Почётной грамотой Совета профессионального союза работников РАН отмечен:
Самарцев В.В., д.ф.-м.н., зав. лабораторией

Благодарственным письмом Кабинета Министров Республики Татарстан отмечена:
Воронкова В.К., к.ф.-м.н., учёный секретарь, зав. лабораторией

Почётной грамотой Президиума КазНЦ РАН отмечен:
Лисин Н.А., слесарь-электрик

Почётными грамотами КФТИ КазНЦ РАН с присуждением почётного звания “Ветеран КФТИ” отмечены:

Альтшулер Т.С., к.ф.-м.н., с.н.с.
 Богданова Х.Г., д.ф.-м.н., г.н.с.
 Вишневская Г.П., д.ф.-м.н., г.н.с.
 Лисин В.Н., к.ф.-м.н., с.н.с.
 Самарцев В.В., д.ф.-м.н., зав. лабораторией
 Соловаров Н.К., к.ф.-м.н., в.н.с.
 Тейтельбаум Г.Б., д.ф.-м.н., зав. лабораторией
 Хлебников С.Я., к.ф.-м.н., зав. отделом
 Черкасов Ф.Г., к.ф.-м.н., н.с.

Дипломом победителя 2009 года в конкурсе “50 лучших инновационных идей Республики Татарстан” в номинации “Наноимпульс” награждён авторский коллектив в составе: Чушникова А.И. (руководитель), Ибрагимовой М.И., Жеглова Е.П., Петухова В.Ю. (КФТИ КазНЦ РАН), Моисеева В.Н. (Респ. клинический онкологический диспансер МЗ РТ) за проект “Разработка методики диагностики онкоурологических больных с использованием ЭПР”

Участие сотрудников института в преподавательской деятельности

В 2009 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. электропривода и автоматики КГЭУ
 – Элементы автоматики
 Богомолов В.А., ст. преп. каф. информатики и прикладной математики КГТУ (КХТИ)
 – Интернет-технологии
 – Операционные системы
 Бухараев А.А., преп. каф. хим. физики КГУ
 – Химическая кинетика и катализ
 проф. каф. оптики и нанофотоники КГУ
 – Микроскопия микро- и наноструктур
 – Научные основы нанотехнологий
 Гайнутдинов Х.Л., преп. каф. хим. физики КГУ
 – Избранные физические вопросы молекулярной биологии
 преп. каф. физиологии человека и животных КГУ
 – Нейробиология обучения
 проф. каф. анатомии, физиологии и охраны здоровья человека ТГГПУ
 – Механизмы памяти
 – Психофизиология
 Галеев Р.Т., преп. каф. хим. физики КГУ
 – *Mathematica* для решения задач спиновой химии
 Ерёмина Р.М., доц. каф. общей физики КГУ
 – Электричество и магнетизм
 – Молекулярная физика
 – Механика
 – Оптика
 Зарипов М.М., проф. каф. квантовой электроники и радиоспектроскопии КГУ
 – Основы теории спектров электронного парамагнитного резонанса в кристаллах

Калачёв А.А., доц. каф. оптики и нанофотоники КГУ
 – Квантовая оптика
 – Новые физические методы оптической обработки информации
 – Физика лазеров
 Моисеев С.А., доц. каф. хим. физики КГУ
 – Оптическая молекулярная спектроскопия
 Мурсалимов А.Р., преп. каф. хим. физики КГУ
 – Численные методы в физике
 Петрушкин С.В., ассист. каф. оптики и нанофотоники КГУ
 – Оптические свойства наносред
 Петухов В.Ю., проф. каф. физики твёрдого тела КГУ
 – Радиационная физика
 – Современные методы экспериментальной физики
 – Радиационная физика в медицине
 – Физика поверхности и тонких плёнок
 Садчиков Ю.В., доц. каф. “Автомобили и автомобильное хозяйство” КГТУ (КАИ)
 – Автомобили. Конструирование и расчёт
 Салихов К.М., проф., зав. каф. хим. физики КГУ
 – Химическая кинетика и катализ
 – Современные проблемы химической физики
 – Квантовые вычисления и квантовая информатика
 – Строение и молекулярная динамика конденсированных сред
 Самарцев В.В., проф. кафедры оптики и нанофотоники КГУ
 – Проблемы когерентной оптики
 – Лазерная спектроскопия
 – Новые физические методы оптической обработки информации
 – Оптика фемтосекундных лазеров

Сулейманов Н.М., проф. каф. “Электрические станции” КГЭУ

- Введение в специальность. Основы развития энергетики

Тарасов В.Ф., проф. каф. пром. электроники КГЭУ

- Информационно-измерительная техника и электроника
- Физические основы электроники
- Физика сверхпроводимости

Туранов А.Н., доцент каф. электрических сетей и систем КГЭУ

- Применение ЭВМ в электроэнергетике

Фалин М.Л., доц. каф. общей и эксперим. физики ТГГПУ

- Электричество
- Молекулярная физика
- Механика
- Оптика

Черников С.К., проф. каф. проектирования летательных аппаратов КГТУ (КАИ)

- Теория автомобиля

Конференции, организованные КФТИ и при участии КФТИ

1. Выездная сессия Научного совета РАН по физике конденсированных сред, 15–17 июня 2009, Казань (совместно с Научным советом РАН по физике конденсированных сред)
2. International Workshop “Modern Development of Magnetic Resonance”, September 30–October 2, 2009, Kazan (совместно с Государственным образовательным учреждением высшего профессионального образования “Казанским государственным университетом им. В. И. Ульянова-Ленина”)
3. XII International Youth Scientific School “Actual Problems of Magnetic Resonance and Its Application”, October 5–9, 2009, Kazan (совместно с Государственным образовательным учреждением высшего профессионального образования “Казанским государственным университетом им. В. И. Ульянова-Ленина”)
4. Тринадцатая Международная молодёжная научная школа “Когерентная оптика и оптическая спектроскопия”, 26–28 октября 2009, Казань (совместно с Государственным образовательным учреждением высшего профессионального образования “Казанским государственным университетом им. В. И. Ульянова-Ленина”)
5. IX Международный симпозиум по фотонному эхо и когерентной спектроскопии (ФЭКС’2009), 26–31 октября 2009, Казань (совместно с Государственным образовательным учреждением высшего профессионального образования “Казанским государственным университетом им. В. И. Ульянова-Ленина”)
6. Итоговая научная конференция КазНЦ РАН, 4–5 февраля 2010, Казань (стендовая сессия проводилась 7–8 декабря 2009 года при обсуждении итогов 2009 года)
7. Научная конференция молодых учёных, аспирантов и студентов КФТИ КазНЦ РАН, посвящённая 65-летию КазНЦ РАН, 13–14 апреля 2010, Казань

Программы конференций, организованных институтом

Выездная сессия Научного совета РАН по физике конденсированных сред

15 июня 2010 года

Заседание 1

Кведер В.В. (ИФТТ РАН, Черноголовка): Инженерия дефектов для кремниевых солнечных элементов

Муртазаев А.К. (ИФ ДагНЦ РАН, Махачкала): Критические свойства спиновых решёточных систем с фрустрациями

Чугуева И.Н. (ИФТТ РАН, Черноголовка): О деятельности Научного совета РАН по физике конденсированных сред

16 июня 2010 года

Заседание 2

Изюмов Ю.А. (ИФМ УрО РАН, Екатеринбург): Новый класс ВТСП в FeAs-соединениях

Ерёмин М.В. (КГУ, Казань): Эффекты сильных электронных корреляций в спиновой восприимчивости ВТСП

Лёксин П.В. (КФТИ КазНЦ РАН, Казань): Триплетная сверхпроводимость в тонкоплёночных гетероструктурах сверхпроводник/ферромагнетик

Заседание 3

Волк Т.Р. (ИК РАН, Москва): Регулярные доменные структуры – актуальное направление в физике сегнетоэлектричества (обзор)

Сахненко В.П. (НИИФ ЮФУ, Ростов-на-Дону): Мультиферроики
 Мамин Р.Ф. (КФТИ КазНЦ РАН, Казань): Уникальные магнитоэлектрические свойства и локально-индуцированные полярные состояния в манганитах

Заседание 4

Хайбуллин Р.И. (КФТИ КазНЦ РАН, Казань), Тагиров Л.Р. (КГУ, Казань), Базаров В.В. (КФТИ КазНЦ РАН, Казань): Ионный синтез магниторазбавленных полупроводников на основе рутила (TiO_2)
 Тарасов В.Ф. (КФТИ КазНЦ РАН, Казань): Зарядовое состояние примесных ионов хрома в синтетическом форстерите. Исследование методом высокочастотной ЭПР-спектроскопии
 Вахрушев С.Б. (ФТИ РАН, Санкт-Петербург): Комплексное использование методов рассеяния нейтронов и синхротронного излучения для исследования твёрдых тел

17 июня 2010 года

Заседание 5

Глезер А.М. (ЦНИИЧермет, Москва): Физика больших пластических деформаций
 Тагиров М.С. (КГУ, Казань): Радиоспектроскопия аэрогелей

Заседание 6

Карпов М.И. (ИФТТ РАН, Черноголовка): Особенности пластической деформации и физические свойства многослойных наноструктурных композитов
 Жариков Е.В. (РХТУ, Москва): Рост кристаллов в условиях контролируемых вибраций
 Шакирзянов М.М., Мигачёв С.А., Садыков М.Ф. (КФТИ КазНЦ РАН, Казань): Специфические эффекты в акустике антиферромагнетиков

Заседание 7

Степанов А.Л., Файзрахманов И.А. (КФТИ КазНЦ РАН, Казань): Нелинейно-оптические свойства метаматериалов с металлическими наночастицами
 Ельцов К.Н. (ИОФ РАН, Москва): Измерения и технологические воздействия на атомном уровне с использованием СТМ
 Антонов В.Е. (ИФТТ РАН, Черноголовка): Правила фаз и соприкосновения фазовых пространств

Заседание 8

Страумал Б.Б. (ИФТТ РАН, Черноголовка): Зернограничные фазы и ферромагнетизм в оксиде цинка
 Левченко А.А. (ИФТТ РАН, Черноголовка): Турбулентный каскад на поверхности жидкости в диссипативной области
 Баязитов Р.М. (КФТИ КазНЦ РАН, Казань): Импульсная тонкоплёночная модификация полупроводниковых структур

International Workshop "Modern Development of Magnetic Resonance"

September 30, 2009

First session

Chair: Teitelbaum G.B.
 Möbius K. (Free University, Berlin, Germany): Probing Functional States of Membrane Proteins by High-Field EPR Methods
 Dzuba S.A. (Institute of Chemical Kinetics and Combustion, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia): ENDOR Study of Low-Temperature Molecular Librations of Nitroxides in Molecular Glasses: Quantum Effects, Comparison with Low-Frequency Raman Scattering
Konov A.B., Salikhov K.M., Galeeva A.I., Selivanova N.M., Galyametdinov Yu.G. (Kazan Physical-Technical Institute, Russian Academy of Sciences, Kazan, Russia): Diffusion in Liquid Crystals as Studied by PFG NMR

Second session

Chair: Moiseev S.A.
 Kothe G. (University of Freiburg, Freiburg, Germany): Exploring Quantum Oscillations in Photo-Excited Triplet States
 Doronin S.I., Fedorova A.V., Fel'dman E.B., Zenchuk A.I. (Institute of Problems of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, Russia): Multiple Quantum NMR Dynamics of a Gas of Spin-1/2 Carrying Molecules in Nanopores
 Aminov L.K., Kurkin I.N., Rakhmatullin R.M. (Kazan State University, Kazan, Russia): EPR of Gd^{3+} Ions in Y-Doped Cerium Nanocrystals

Third session

Chair: Suleimanov N.M.
 Goldfarb D. (Weizmann Institute of Science, Rehovot, Israel): Correlation Spectroscopy and Distance Measurements at High Fields
Eremina R.M., Fazlishanov I.I., Yatsyk I.V. (Kazan Physical-Technical Institute, Russian Academy of Sciences, Kazan, Russia), Mukovskii Ya.M. (Moscow Institute of Steel and Alloys, Moscow, Russia): Phase Separation in $\text{Eu}_{0.6}\text{La}_{0.4-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$
Orlinskii S.B. (Kazan State University, Kazan, Russia), Schmidt J. (Leiden University, Leiden, The Netherlands), Baranov P. (Ioffe Physico-Technical Institute, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia), Donega C., Meigerink A. (Utrecht University, Utrecht, The Netherlands): Dynamic Nuclear Polarization by Means of Shallow Donors in Nanoparticles

October 1, 2009

Fourth session

Chair: Golenischev-Kutuzov V.A.

Ziatdinov A.M. (Institute of Chemistry, Far-Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia): Spins of Conduction Electrons as a Probe of Physical and Chemical Transformations in Graphite and Its Intercalation Compounds

Falin M.L. (Kazan Physical-Technical Institute, Russian Academy of Sciences, Kazan, Russia): Spectroscopy of Rare-Earth Ions in Crystals with the Perovskite Structure

Ulanov V.A., Zaripov M.M., Siraev A.D. (Kazan Physical-Technical Institute, Russian Academy of Sciences, Kazan, Russia): Paramagnetic Ni Centers in BaF₂ Crystals

Tagirov M.S. (Kazan State University, Kazan, Russia): On the History of the Chair of Quantum Electronics and Radiospectroscopy of the Kazan State University

Malkin B.Z. (Kazan State University, Kazan, Russia): Raby Oscillations in the Electron-Nuclear System of CaWO₄:Er³⁺

Eremin M.V. (Kazan State University, Kazan, Russia): Peculiarities of Magnetic Properties of SrVO₄

October 2, 2009

Fifth session

Chair: Petukhov V.Yu.

Ivanshin V.A. (Kazan State University, Kazan, Russia): Novel Type of ESR Excitations in Dense Intermetallic Compounds

Kataev V. (Leibniz Institute for Solid State and Materials Research, Dresden, Germany): Disclosing Spin Polarons in Cubic Cobaltites by Magnetic Resonance Spectroscopy

Seventh session

Chair: Garifullin I.A.

Vavilova E.L. (Kazan Physical-Technical Institute, Russian Academy of Sciences, Kazan, Russia): High-Temperature Ferromagnetism of Li-Doped Vanadium Oxide Nanotubes

Klochkov A.V. (Kazan State University, Kazan, Russia): NMR of ³He in Aerogel

Eighth session

Chair: Salikhov K.M.

The Zavoisky Award Ceremony and Lecture of the Zavoisky Award 2009 Laureate

Goldfarb D. (Weizmann Institute of Science, Rehovot, Israel): Spins, Molecules and Magnets

Итоговая научная конференция КазНЦ РАН

Секция физическая

Стендовая сессия

7–8 декабря 2009 года

Сессия I

Салихов К.М.: Вклад обменного и диполь-дипольного взаимодействий в форму спектров ЭПР растворов нитроксильных радикалов

Салихов К.М.: Электронный парамагнитный резонанс: от фундаментальных исследований к перспективным применениям и премия имени Е. К. Завойского

Кандрашкин Ю.Е., Салихов К.М.: Моделирование квантовой телепортации в реакционных центрах фотосинтеза

Галеев Р.Т.: Особенности формы линии ЭПР димеров, вызванные спин-решеточной релаксацией

Мамбетов А.Е.: Новый алгоритм экспериментального определения параметров спин-гамильтониана триплетного монокристалла

Моисеев С.А.: Оптическая квантовая память на рамановском эхе

Арсланов Н.М., Моисеев С.А.: “Магнитные” и “электрические” световые волны в метаматериалах

Савостина Л.И. (КФТИ КазНЦ РАН), Аминова Р.М. (КГУ): Изучение методами функционала плотности механизма реакции образования пятичленных фосфоланов

Клековкина В.В. (КГУ, КФТИ КазНЦ РАН), Аминова Р.М. (КГУ), Чачков Д.В. (ОИТ КазНЦ РАН): Неэмпирические расчёты параметров кристаллов и сплавов методами псевдопотенциала и функций Грина

Суханов А.А., Воронкова В.К., Хайрулдинов И.Т., Галеев Р.Т. (КФТИ КазНЦ РАН), Андрух М. (Университет Бухареста, г. Бухарест, Румыния): Обменные взаимодействия между димерами Cu-Gd в цепочке [LCuGd(acdca)_{1,5}(H₂O)₂]_n·13H₂O

Суханов А.А. (КФТИ КазНЦ РАН), Иваньшин В.А., Литвинова Т.О. (КГУ), Соколов Д.А. (Университет Эдинбурга, г. Эдинбург, Великобритания; Университет Мичигана, г. Анн-Арбор, США), Аронсон М.К. (Университет Мичигана, г. Анн-Арбор, США; Брукхэвенская национальная лаборатория, Нью-Йорк, США): ЭПР интерметаллида YbRh₂Rb

Мингалиева Л.В., Воронкова В.К., Галеев Р.Т., Суханов А.А.: Анизотропия обменного взаимодействия между ионами неодима и особенности спектра ЭПР поликристаллического образца соединения {[Nd₂(α-C₄H₇OSO₂)₆(H₂O)₂]}_n

Суханов А.А., Воронкова В.К., Бакиров М.М. (КФТИ КазНЦ РАН), Новицкий Г. (Университет Молдовы, Кишинёв, Молдавия): Исследование влияния типа

- редкоземельного иона и анизотропии локальных свойств ионов железа на формирование спиновых и магнитных свойств изоструктурных многоядерных кластеров Fe_2Re_2 ($\text{Re}=\text{Y}, \text{Gd}, \text{Dy}$)
- Зарипов Р.Б., Салихов К.М.: Анализ проявления особенностей в спектрах частот модуляции огибающей сигналов электронного спинового эха для определения констант сверхтонкого взаимодействия радиального центра с окружающими магнитными ядрами
- Конов К.Б., Зарипов Р.Б., Воронкова В.К.: Исследование возможности определения спиновых состояний парамагнитных кластеров импульсными методами ЭПР
- Гнездилов О.И. (КФТИ КазНЦ РАН), Гайсин Н.К. (КГТУ), Паширова Т.Н., Жильцова Е.П., Лукашенко С.С., Захарова Л.Я. (ИОФХ КазНЦ РАН): Исследование процессов ассоциации ряда несимметричных димерных катионных ПАВ методом ^1H ЯМР-спектроскопии с ИГМП
- Обыночный А.А., Июдин В.С., Салихов К.М.: Исследование спектроскопическими методами первичных фотохимических стадий в фотодинамических реакциях типа порфирина-кислород-стабильный радикал
- Сафиуллин Г.М., Никифоров В.Г., Лобков В.С., Самарцев В.В., Леонтьев А.В.: Фемтосекундный эхо-процессинг в полимерной плёнке, допированной красителем, при комнатной температуре
- Леонтьев А.В., Иванин К.В., Лобков В.С., Салихов К.М., Самарцев В.В., Сафиуллин Г.М.: Исследование кристалла CdS методами четырёхволнового смешения
- Иванин К.В., Леонтьев А.В., Лобков В.С., Салихов К.М., Самарцев В.В.: Исследование спиновой динамики в 2DEG методами нелинейной спектроскопии
- Шмелёв А.Г., Никифоров В.Г., Сафиуллин Г.М., Лобков В.С.: Спектроскопия и контроль колебательно-вращательной динамики молекул в жидкостях методом оптического эффекта Керра
- Гатиятов Р.Г., Лисин В.Н., Бухараев А.А.: Фазовый переход в магнитных наноконтактах никеля, индуцированный током высокой плотности
- Зиганшина С.А., Бизяев Д.А., Лебедев Д.В., Чукланов А.П., Бухараев А.А.: Атомно-силовая микроскопия наночастиц никеля, обладающих электрокаталитическими свойствами
- Севастьянов М.Г. (КГУ), Зиганшина С.А., Бизяев Д.А., Лебедев Д.В., Чукланов А.П., Бухараев А.А. (КФТИ КазНЦ РАН): In-situ АСМ при электрохимическом осаждении Ni
- Бородин П.А., Нургазизов Н.И., Бизяев Д.А. (КФТИ КазНЦ РАН), Меркутов Д.А. (КГУ), Бухараев А.А. (КФТИ КазНЦ РАН): Модификация доменной структуры в плёнках Co методом анодного окисления с помощью АСМ
- Бородин П.А., Бухараев А.А. (КФТИ КазНЦ РАН), Филатов Д.О., Лапшина М.А., Забалуев А.А. (ННГУ им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород): Визуализация локальной плотности состояний в квантовых точках InAs/GaAs методом комбинированной СТМ/АСМ
- Сулейманов Н.М.: Исследование структуры, каталитических, сорбционных и транспортных свойств новых функциональных материалов для топливных элементов и литий-ионных батарей
- Куковицкий Е.Ф., Львов С.Г.: Углеродные нанотрубные автокатоды на никелевых кернах
- Герасимов К.И., Фалин М.Л.: Оптическое детектирование ЭПР на возбуждённых состояниях и магнитооптическая спектроскопия парамагнитных центров кубической симметрии Yb^{3+} в кристаллах MeF_2 ($\text{Me} = \text{Cd}, \text{Ca}, \text{Pb}$)
- Фалин М.Л., Латыпов В.А. (КФТИ КазНЦ РАН), Аникеев О.А. (КГУ), Хайдуков Н.М. (ИОНХ РАН, г. Москва), Калленс Ф., Фрилинк Х. (Университет Гента, г. Гент, Бельгия), Хофштеттер А. (Университет Гиссена, г. Гиссен, Германия): Экспериментальное и теоретическое исследование суперсверхтонкого взаимодействия ионов Yb^{3+} в монокристаллах CsCaF_3 и Cs_2NaYF_6
- Уланов В.А., Зарипов М.М. (КФТИ КазНЦ РАН), Сираев А.Д. (КГЭУ), Шакуров Г.С. (КФТИ КазНЦ РАН): Парамагнитные центры никеля в кристаллах $\text{BaF}_2:\text{Ni}$
- Ерёмина Р.М., Фазлижанов И.И., Яцык И.В., Шарипов К.Р. (КФТИ КазНЦ РАН), Муковский Я.М. (МИС и С, г. Москва): Фазовое расслоение в керамике $\text{Eu}_{0.6}\text{La}_{0.4-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($x = 0.1; 0.13; 0.15; 0.2$)
- Парфёнов В.В. (КГУ), Ерёмина Р.М. (КФТИ КазНЦ РАН), Нигматуллина И.И. (КГУ): Исследование фазового расслоения в манганитах европия, допированных железом
- Тарасов В.Ф., Коновалов А.А.: Исследование структуры примесных центров трёхвалентного хрома в синтетическом форстерите методом высокочастотной ЭПР-спектроскопии
- Салихов Р.И., Гарифуллин И.А., Гарифьянов Н.Н. (КФТИ КазНЦ РАН), Тагиров Л.Р. (КГУ), Вестерхолт К., Цабель Х. (Институт экспериментальной физики твёрдого тела Рурского университета, г. Бохум, Германия): Исследование эффекта спинового экранирования в тонкоплёночных гетероструктурах сверхпроводник/ферромагнетик с помощью ядерного магнитного резонанса
- Альтшулер Т.С., Горюнов Ю.В.: Неизотропность магнитного момента полярона и магнитное фазовое расслоение в гексабориде европия
- Мамин Р.Ф., Бизяев Д.А., Бухараев А.А., Мигачёв С.А. (КФТИ КазНЦ РАН), Юсупов Р.В. (КГУ): Зарядовое и фазовое расслоение и индуцированные состояния
- Панарина Н.Ю., Таланов Ю.И., Шапошникова Т.С. (КФТИ КазНЦ РАН), Бейсенгулов Н.Р. (КГУ), Вавилова Е.Л. (КФТИ КазНЦ РАН), Катаев В.Е., Бер Г., Кондрат А., Хесс К., Лепс Н., Клингелер Р., Бюхнер Б. (Лейбницевский институт физики твёрдого тела и материаловедения, г. Дрезден, Германия): Исследование эффектов пиннинга в керамических

образцах пниктидов железа $\text{SmO}_{1-x}\text{F}_x\text{FeAs}$ с помощью измерений микроволнового поглощения

- Валидов А.А. (КФТИ КазНЦ РАН), Лаврентьева Е.М. (КГУ), Озеров М., Звягин С.А. (Лаборатория сильных магнитных полей, г. Дрезден, Германия), Тернбул М.М., Ланди К.П. (Университет Кларка, г. Рочестер, США), Тейтельбаум Г.Б. (КФТИ КазНЦ РАН): Квантовая критическая динамика антиферромагнитных гейзенберговских цепочек ($S = 1/2$) по данным ЭПР в CuPzN
- Черников С.К., Русских И.В. (КФТИ КазНЦ РАН), Рябинин А.В. (КГТУ им. А. Н. Туполева): Использование различных технологий распараллеливания при вычислении спектров ЭПР
- Черников С.К., Файзуллин А.М. (КФТИ КазНЦ РАН), Ахмадышин А.Н. (КГТУ им. А. Н. Туполева): Расчётно-экспериментальные исследования динамики кабины грузового автомобиля при ударе

Сессия 2

- Галаялтинов М.К., Фахрутдинов А.Р., Гафиятуллин Н.М., Биктимиров Э.Ф., Салихов К.М., Фаттахов Я.В.: Усилитель тока градиентов для специализированного магнитно-резонансного томографа с индукцией магнитного поля 1.5 Тл
- Фаттахов Я.В., Галаялтинов М.Ф., Фаррахов Б.Ф., Захаров М.В.: Методика лазерной диагностики структурно-фазовых превращений на поверхности полупроводников
- Богданова Х.Г. (КФТИ КазНЦ РАН), Булатов А.Р. (КГЭУ): Решёточные, электрические и магнитные эффекты в манганитах лантана $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($x = 0.125; 0.15$ и 0.175)
- Мигачёв С.А. (КФТИ КазНЦ РАН), Садыков М.Ф., Иванов Д.А. (КГЭУ), Шакирзянов М.М. (КФТИ КазНЦ РАН): Экспериментальная установка для исследования акустооптических явлений в магнитных материалах
- Домрачева Н.Е. (КФТИ КазНЦ РАН), Морозов В.И. (ИОФХ КазНЦ РАН), Груздев М.С. (Институт химии растворов, г. Иваново), Манапов Р.А., Пятаев А.В. (КГУ), Латтерманн Г. (Университет Байройта, г. Байройт, Германия): Железосодержащие жидкокристаллические дендримеры с фотоактивными оптическими свойствами
- Груздев М.С. (Институт химии растворов, г. Иваново), Пятаев А.В., Манапов Р.А. (КГУ), Морозов В.И. (ИОФХ КазНЦ РАН), Домрачева Н.Е. (КФТИ КазНЦ РАН): Железоорганические гели – новый класс пористых органических полимеров
- Туранова О.А., Иванова Г.И., Иванова Т.А., Гафиятуллин Л.Г., Туранов А.Н., Овчинников И.В.: Спин-переменные комплексы Fe(III) со светочувствительным лигандом
- Туранова О.А., Иванова Г.И., Иванова Т.А., Мингалиева Л.В., Овчинников И.В.: Влияние структуры лигандного окружения на спин-переменные и жидкокри-

сталлические свойства биядерных и моноядерных комплексов железа (III) с пентадентантным основанием Шиффа

- Иванова Т.А., Туранова О.А., Овчинников И.В. (КФТИ КазНЦ РАН), Анджеевский Б., Аугустиныяк-Яблоков М. (Институт молекулярной физики ПАН, г. Познань, Польша): Особенности спинового перехода трисди-тиокарбаматов Fe(III)
- Вишневская Г.П., Овчинников И.В., Фролова Е.Н.: Температурные зависимости параметров спектров ЭПР спин-переменных комплексов Fe(III) в ионообменном полимере
- Юртаева С.В.: ЭПР-спектроскопия ферритина в здоровых и опухолевых тканях человека
- Гончаров В.А.: Магнитометры с токовым датчиком магнитного поля: результаты и перспективы
- Яфарова Г.Г., Андрианов В.В., Юртаева С.В., Июдин В.С., Муранова Л.Н., Гайнутдинов Х.Л.: Динамика содержания оксида азота в сердце крыс при адаптации к нарушению работы сердца (десимпатизации)
- Андрианов В.В., Июдин В.С., Гайнутдинова Т.Х., Яфарова Г.Г., Гайнутдинов Х.Л.: Исследование методом ЭПР интенсивности продукции оксида азота в отделах мозга крыс после ишемического инсульта
- Шахмуратов Р.Н. (КФТИ КазНЦ РАН), Вагизов Ф. (КГУ, Техасский университет, г. Колледж Стейшн, США), Одюрс Дж. (Католический университет г. Левина, г. Левин, Бельгия), Кочаровская О. (Техасский университет, г. Колледж Стейшн, США): Теоретическое и экспериментальное исследование возможности создания буферной памяти для однофотонных волновых пакетов
- Калачёв А.А., Калинин А.А., Латыпов И.З., Самарцев В.В., Шкаликов А.В.: Генерация узкополосных бифотонов в резонаторе
- Калачёв А.А.: Преобразование однофотонных волновых пакетов в устройствах квантовой памяти на основе перестраиваемых резонаторов
- Каримуллин К.Р. (КГУ, КФТИ КазНЦ РАН): Оптическая спектроскопия на основе некогерентного фотонного эха
- Степанов А.Л., Нуждин В.И., Файзрахманов И.А., Валеев В.Ф., Базаров В.В.: Лазерный отжиг силикатного стекла с ионно-синтезированными наночастицами серебра и меди
- Степанов А.Л., Валеев В.Ф., Нуждин В.И.: Нелинейная оптическая рефракция ионно-синтезированных наночастиц меди и серебра в ближней ультрафиолетовой области
- Степанов А.Л., Осин Ю.Н. (КФТИ КазНЦ РАН), Нуждин Е.В. (КГТУ им. А. Н. Туполева), Файзрахманов И.А., Валеев В.Ф., Нуждин В.И. (КФТИ КазНЦ РАН): Радиационная стойкость полимерных фотонных кристаллов
- Степанов А.Л., Осин Ю.Н.: Возбуждение плазмонных волн на нанощелях в тонкой плёнке золота

Халитов Н.И. (КГУ), Гатиятова Ю.И., Валеев В.Ф., Хайбуллин Р.И. (КФТИ КазНЦ РАН): Модификация структурных, оптических и магнитных свойств титаната бария (BaTiO_3) путём имплантации ионов кобальта

Вахитов И.Р. (КГУ), Нуждин В.И., Осин Ю.Н., Хайбуллин Р.И. (КФТИ КазНЦ РАН): Исследование магнитных свойств диоксида титана (TiO_2), имплантированных ионами железа

Баязитов Р.М., Баталов Р.И., Галяутдинов М.Ф. (КФТИ КазНЦ РАН), Ивлев Г.Д., Гацкевич Е.И. (ИФ НАНБ, г. Минск, Беларусь): Собственное поглощение кремния и генерация электронно-дырочных пар при лазерной обработке кремниевых структур

Баязитов Р.М., Баталов Р.И. (КФТИ КазНЦ РАН), Галкин Н.Г., Горошко Д.Л., Чусовитин Е.А., Полярный В.О. (ИАПУ ДВО РАН, г. Владивосток): Создание тройных гетероструктур на основе полупроводниковых силицидов с использованием ионной имплантации и молекулярно-лучевой эпитаксии

Ибрагимова М.И., Чушников А.И. (КФТИ КазНЦ РАН), Моисеев В.Н. (Респ. клинический онкологический диспансер МЗ РТ), Петухов В.Ю., Жеглов Е.П. (КФТИ КазНЦ РАН): Возможности ЭПР-спектроскопии крови для диагностики онкоурологической патологии

Гумаров Г.Г., Петухов В.Ю., Коновалов Д.А., Халиков Р.А.: Исследование анизотропии ферромагнитных плёнок, полученных методом ионно-лучевого синтеза во внешнем магнитном поле

Гумаров Г.Г., Петухов В.Ю., Ахметов М.М., Жеглов Е.П.: Исследование природы парамагнитных центров в механоактивированном глюконате кальция

Устная сессия

Секционные заседания

4 февраля 2010 года

Заседание 1

Председатель: Моисеев С.А.

Сафиуллин Г.М., Никифоров В.Г., Лобков В.С., Самарцев В.В., Леонтьев А.В.: Фемтосекундный эхо-процессинг в полимерной плёнке, допированной красителем, при комнатной температуре

Леонтьев А.В., Иванин К.В., Лобков В.С., Салихов К.М., Самарцев В.В., Сафиуллин Г.М.: Исследование кристалла CdS методами четырёхволнового смешения

Иванин К.В., Леонтьев А.В., Лобков В.С., Салихов К.М., Самарцев В.В.: Исследование спиновой динамики в 2DEG методами нелинейной спектроскопии

Шмелёв А.Г., Никифоров В.Г., Сафиуллин Г.М., Лобков В.С.: Спектроскопия и контроль колебательно-вращательной динамики молекул в жидкостях методом оптического эффекта Керра

Калачёв А.А.: Преобразование однофотонных волновых пакетов в устройствах квантовой памяти на основе перестраиваемых резонаторов

Заседание 2

Председатель: Тейтельбаум Г.Б.

Кандрашкин Ю.Е., Салихов К.М.: Моделирование квантовой телепортации в реакционных центрах фотосинтеза

Клековкина В.В. (КГУ, КФТИ КазНЦ РАН), Аминова Р.М. (КГУ), Чачков Д.В. (ОИТ КазНЦ РАН): Неэмпирические расчёты параметров кристаллов и сплавов методами псевдопотенциала и функций Грина

Салихов К.М.: Вклад обменного и диполь-дипольного взаимодействий в форму спектров ЭПР растворов нитроксильных радикалов

Черников С.К., Русских И.В. (КФТИ КазНЦ РАН), Рябинин А.В. (КГТУ им. А. Н. Туполева): Использование различных технологий распараллеливания при вычислении спектров ЭПР

Заседание 3

Председатель: Тарасов В.Ф.

Вишневская Г.П., Овчинников И.В., Фролова Е.Н.: Температурные зависимости параметров спектров ЭПР спин-переменных комплексов Fe(III) в ионообменном полимере

Мингалиева Л.В., Воронкова В.К., Галеев Р.Т., Суханов А.А.: Анизотропия обменного взаимодействия между ионами неодима и особенности спектра ЭПР поликристаллического образца соединения $\{\text{Nd}_2(\alpha\text{-C}_4\text{H}_7\text{O}_2\text{COO})_6(\text{H}_2\text{O})_2\}_n$

Панарина Н.Ю., Таланов Ю.И., Шапошникова Т.С. (КФТИ КазНЦ РАН), Бейсенгулов Н.Р. (КГУ), Вавилова Е.Л. (КФТИ КазНЦ РАН), Катаев В.Е., Бер Г., Кондрат А., Хесс К., Лепс Н., Клигелер Р., Бюхнер Б. (Лейбницевский институт физики твёрдого тела и материаловедения, г. Дрезден, Германия): Исследование эффектов пиннинга в керамических образцах пниктидов железа $\text{SmO}_{1-x}\text{F}_x\text{FeAs}$ с помощью измерений микроволнового поглощения

Ибрагимова М.И., Чушников А.И. (КФТИ КазНЦ РАН), Моисеев В.Н. (Респ. клинический онкологический диспансер МЗ РТ), Петухов В.Ю., Жеглов Е.П. (КФТИ КазНЦ РАН): Возможности ЭПР-спектроскопии крови для диагностики онкоурологической патологии

5 февраля 2010 года

Заседание 4

Председатель: Петухов Ю.В.

Гатиятов Р.Г., Лисин В.Н., Бухараев А.А.: Фазовый переход в магнитных наноконтактах никеля, индуцированный током высокой плотности

- Альтшулер Т.С., Горюнов Ю.В.: Неизотропность магнитного момента полярона и магнитное фазовое расслоение в гексабориде европия
- Мигачёв С.А. (КФТИ КазНЦ РАН), Садыков М.Ф., Иванов Д.А. (КГЭУ), Шакирзянов М.М. (КФТИ КазНЦ РАН): Экспериментальная установка для исследования акустооптических явлений в магнитных материалах
- Гончаров В.А.: Магнитометры с токовым датчиком магнитного поля: результаты и перспективы
- Фаттахов Я.В., Галютдинов М.Ф., Фаррахов Б.Ф., Захаров М.В.: Методика лазерной диагностики структурно-фазовых превращений на поверхности полупроводников
- Салихов К.М.: Презентация книги: “Электронный парамагнитный резонанс: от фундаментальных исследований к перспективным применениям и премия имени Завойского” (Салихов К.М., ред.). Веллингтон, Новая Зеландия: AXAS Publishing Ltd. 2009.

Научная конференция молодых учёных, аспирантов и студентов КФТИ КазНЦ РАН 2009, посвящённая 65-летию КазНЦ РАН

13 апреля 2010 года

Секция молодых учёных и аспирантов
Председатель: Петрушкин С.В.

Сессия 1

- Салихов К.М.: 65-летию со дня основания КФТИ посвящается
- Баталов Р.И.: Импульсный синтез полупроводниковых силицидов и твёрдых растворов для кремниевой оптоэлектроники (приглашён.)
- Гаврилова Т.П.: Температурная зависимость удельной теплоёмкости квазиодномерного магнетика CuTe_2O_5
- Гатиятов Р.Г.: Баллистический и диффузный режимы транспорта электронов в наноконтактах магнетиков
- Каримуллин К.Р.: Оптическая дефазировка в примесном полимере в широком диапазоне высоких температур: исследование методом некогерентного фотонного эха
- Конов А.Б.: Измерение коэффициента диффузии молекул в неоднородных средах методом ЯМР: численное моделирование
- Гафиятуллин Н.М.: Фотохимические свойства жидкокристаллических замещённых стирилпиридинов
- Зинкевич Т.А.: Исследование молекулярной динамики белка в микросекундном временном диапазоне

Сессия 2

- Латыпов И.З.: Получение узкополосных двухфотонных состояний света в оптическом резонаторе
- Новиков Г.А.: Импульсная модификация плёнок железа, осаждённых на кремний магнетронным распылением
- Фаттахова Ю.З.: Генерация фотонов с контролируемой временной формой в процессе спонтанного параметрического рассеяния от импульсной накачки
- Суханов А.А.: ЭПР четырёхъядерных кластеров $[\text{Fe}_2^{\text{III}} \times \text{Ln}_2^{\text{III}}(\mu_3\text{-OH})_2(\text{teaH})_2(\text{O}_2\text{CPh})_6] \cdot 3\text{MeCN}$ {Ln = Y^{3+} , Gd^{3+} , Dy^{3+} , Nd^{3+} }
- Халиков Р.А.: Исследование магнитных свойств ионно-синтезированных тонких плёнок методом меридионального эффекта Керра
- Шарипов К.Р.: Исследование свойств керамики $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Mn}_{0.925}\text{Zn}_{0.075}\text{O}_3$ ($x = 0.075; 0.095; 0.115$) методом ЭПР

14 апреля 2010 года

Секция студентов
Председатель: Коновалов А.А.

Сессия 3

- Абдуллин Д.Р.: ЭПР-исследование соединений $\text{Li}_2\text{M}_2(\text{MoO}_4)_3$ (M = Ni, Co, Mn) как материалов для литийионных ячеек
- Александров А.С.: ЯМР Q-метр с протяжкой и модуляцией частоты
- Байсупова Э.Р.: Применение комбинированных методов квантовой и молекулярной механики для расчётов химических сдвигов фосфорсодержащих молекул в растворе
- Куржунов Д.В.: Фотоиндуцированные центры в кристалле $\text{KTa}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ ($x = 0.012$): ЭПР-исследование
- Ситдинов Д.Т.: Электронный парамагнитный резонанс фитофульгурита
- Бейсенгулов Н.Р.: Исследование керамических $\text{SmO}_{1-x}\text{F}_x\text{FeAs}$ методом нерезонансного микроволнового поглощения
- Клековкина В.В.: Сверхтонкие поля на примесных центрах переходных металлов в кристалле никеля: *ab initio* расчёты в приближении KKR-CPA
- Хайрулдинов И.Т.: Спин-спиновые взаимодействия в соединении $[\text{LCu}_2\text{Gd}_3(\text{acda})_{1.5}(\text{H}_2\text{O})_2] \cdot 13\text{H}_2\text{O}$
- Халитов Н.И.: Исследование структурных и физических свойств титаната бария (BaTiO_3), имплантированного ионами кобальта

Участие сотрудников института в конференциях

Международные конференции

International Workshop “Nanofluid Properties Benchmark Exercise” (INPBE), January 29–30, 2009, Beverley Hills, California, USA

Turanov A., Tolmachev Y., Sprunt S., Selinger J.: Heat- and mass-transport in aqueous silica nanofluids (oral)

73 Annual Meeting of the Condensed Matter Division of the German Physical Society, February 25–29, 2009, Dresden, Germany

Kataev V., Alfonsov A., Vavilova E., Büchner B., Podlesnya A., Russina M., Furrer A., Strassle Th., Pomjakushina E., Conder K., Khomskii D.I.: Low temperature magnetism of $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{CoO}_3$ ($x = 0.002$) (oral)

Yehia M., Vavilova E., Kataev V., Klingeler R., Volkova O., Lapsheva E., Shutov V., Savelieva O., Vasiliev A.N., Büchner B.: Magnetic properties of the new low dimensional $S = 1/2$ system: $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (oral)

Alfonsov A., Vavilova E., Kataev V., Büchner B., Podlesnyak A., Russina M., Furrer A., Straessle Th., Pomjakushina E., Conder K., Khomskii D.I.: Spin-state polaron in lightly hole doped LaCoO_3 (poster)

Yehia M., Vavilova E., Kataev V., Klingeler R., Volkova O., Lapsheva E., Shutov V., Savelieva O., Vasiliev A.N., Büchner B.: High field ESR study of the new low dimensional $S = 1/2$ system: $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (poster)

3 International Symposium on Quantum Optics and Informatics, March 14–16, 2009, King Abdul Aziz City of Science and Technology, Riyadh, Saudi Arabia

Arslanov N.M., Moiseev S.A., Kamli A.: Low loss surface polaritons with metamaterial slab (invited)

Moiseev S.A.: Raman echo quantum memory with surface polaritons (invited)

XIII Международный симпозиум “Нанопизика и нанопизика”, 16–20 марта 2009, Нижний Новгород, Россия

Бухараев А.А.: Современные экспериментальные исследования по перемагничиванию наноструктур спин-поляризованным током (приглашён.)

Гарифуллин И.А., Гарифьянов Н.Н., Салихов Р.И., Тагиров Л.Р.: Экспериментальное наблюдение эффекта спинового экранирования в тонкоплёночных гетероструктурах сверхпроводник/ферромагнетик (устн.)

Хайбуллин Р.И., Базаров В.В., Осин Ю.Н., Ибрагимов Ш.З., Тагиров Л.Р.: Влияние кислородных вакансий на ферромагнетизм магниторазбавленных оксидных полупроводников (устн.)

Бизяев Д.А., Гатиятов Р.Г., Бухараев А.А.: Особенности формирования магнитных доменов в наноплёнке

кобальта с пространственно-модулированным рельефом (стенд.)

Гатиятов Р.Г., Бухараев А.А.: Изучение магнитных наноконтактов с квантованной проводимостью (стенд.)

Зиганшина С.А., Бизяев Д.А., Севастьянов М.Г., Чукланов А.П., Бухараев А.А.: Атомно-силовая микроскопия наночастиц никеля, обладающих электрокаталитическими свойствами (стенд.)

Соколов Н.С., Банщиков А.Г., Гастев С.В., Горюнов Ю.В., Кричевцов Б.Б., Кютт Р.Н., Нащёкин А.В., Сутурин С.М., Шимада Т.: Структура и магнитные свойства массивов эпитаксиальных наночастиц кобальта на поверхности фторида кальция (стенд.)

International Nanotechnology Conference “NanoIsrael”, March 30–31, 2009, Jerusalem, Israel

Aktaş B., Rameev B.Z., Khaibullin R.I.: FMR studies of spintronic materials (oral)

10 European Conference on Liquid Crystals (ECLC 2009), April 19–24, 2009, Colmar, France

Selivanova N., Galeeva A., Lobkov V., Galyametdinov Yu.: Lyotropic mesophases as template for d-, f-elements nanoorganisation (oral)

SPIE Europe: Optics + Optoelectronics, April 20–23, 2009, Prague, Czech Republic

Stepanov A.L., Evluykhin A., Kiyani R., Chichkov B.N.: Interaction of a surface plasmon polariton beam with chain of nanoparticles (oral)

III Симпозиум с международным участием “Опухоли головы и шеи”, 4–7 мая 2009, Сочи, Россия

Балакин В.Е., Биктимиров Э.Ф., Гилязутдинов И.А., Журавлёв А.Е., Салихов К.М., Сахапова Л.Р., Фатахов Я.В., Хабилов Р.А., Хасанов Р.Ш., Хафизов Р.Т., Юсупова Л.Р.: Исследования эффективности визуализации с применением контрастных веществ в низко-полевой томографии (стенд.)

International Workshop on Rare-Earth-Ion-Doped Solids for Quantum Information, May 11–12, 2009, Lund, Sweden

Kalachev A.A.: Generation of single photons with a controlled waveform using cavity enhanced SPDC and cavity-assisted quantum storage (oral)

Joint European Japanese Conference “Frustration in Condensed Matter”, May 12–15, 2009, Lyon, France

Kataev V., Vavilova E., Moskvina A.S., Arango Y., Sotnikov A., Drechsler S.-L., Volkova O., Vasiliev A., Büchner B.: Interplay between paramagnetism and paraelectricity in the frustrated spin chain magnet $\text{Li}_2\text{ZrCuO}_4$ (oral)

V International Symposium Supramolecular Systems in Chemistry and Biology, May 12–16, 2009, Kiev, Ukraine

Efimova I.G., Ziganshin M.A., Gorbachuk V.V., Soldatov D.V., Ziganshina S.A., Bukharaev A.A.: Formation of nano-structures on the surface of dipeptides thin layer treated by organic vapors (poster)

40 Annual Meeting of the APS Division of Atomic, Molecular and Optical Physics, May 19–23, 2009, Charlottesville, Virginia, USA

Sanders B., Moiseev S., Kamli A.: Low-loss nonlinear polaritonics (oral)

International Conference on Physics, Chemistry and Application of Nanostructures "Nanomeeting 2009", May 26–29, 2009, Minsk, Belarus

Galkin N.G., Galkin K.N., Chusovitin E.A., Vavanova S.V., Maslov A.M., Goroshko D.L., Polyarnyi V.O., Bayazitov R.M., Batalov R.I., Ivlev G.D.: The morphology and optical properties of Fe, Cr and Mg silicide nanocrystallites buried in silicon by ion implantation, pulsed treatments and Si overgrowth (oral)

III International Conference "Fundamental Bases of Mechanochemical Technologies" (FBMT-2009), May 27–30, 2009, Novosibirsk, Russia

Rybin D.S., Konygin G.N., Yelsukov E.P., Porsev V.E., Sharafutdinova D.R., Efremov Y.Y., Gumarov G.G., Petukhov V.Y.: Mechanochemically induced structure state transformations of the gluconic acid salts (oral)

XI International Conference "Mössbauer Spectroscopy and Its Applications", June 1–5, 2009, Ekaterinburg, Russia

Коньгин Г.Н., Елсуков Е.П., Порсев В.Е., Гумаров Г.Г., Шарафутдинова Д.Р.: Исследование механоактивированных биологически активных солей глюконовой кислоты с применением методов мёссбауэровской, ЭПР и ЯМР-спектроскопии (стенд.)

Пятаев А.В., Манапов Р.А., Морозов В.И., Шмуклер Л.Е., Груздев М.С., Тхик Н.В., Сафонова Л.П., Домрачева Н.Е.: Мёссбауэровская спектроскопия металлоорганических гелей (стенд.)

Shakhmuratov R.N., Vagizov F.G., Odeurs J., Kocharovskaya O.A.: Slow gamma-photon with a doublet structure: time delay via a transition from destructive to constructive interference of collectively scattered radiation with the incoming photon (poster)

International Symposium "Spin Waves 2009", June 7–12, 2009, St. Petersburg, Russia

Gatiyatov R.G., Bukharaev A.A.: Volt-ampere characteristics of magnetic nickel nanocontacts under high-density currents (oral)

Validov A.A., Lavrentyeva E.M., Ozerov M., Zvyagin S.A., Turnbull M.M., Landee C.P., Teitel'baum G.B.: ESR of $S = 1/2$ quantum antiferromagnetic chain compound (oral)

5 Nanoscience and Nanotechnology Conference (NanoTR5), June 8–12, 2009, Eskisehir, Turkey

Güler S., Rameev B., Khaibullin R.I., Lopatin O.N., Aktaş B.: EPR study of Mn-implanted and Fe-implanted single crystal TiO_2 rutile (oral)

Güler S., Rameev B., Aktaş B., Thomas A., Drewello V., Reiss G.: FMR and VSM studies of CoFeB spin valve structure (poster)

Advanced Research Workshop "Meso-09" Mesoscopic and Strongly Correlated Electron Systems – 5 Non-Equilibrium and Coherent Phenomena at Nanoscale, June 11–16, 2009, Chernogolovka, Russia

Garifullin I.A.: Experimental observation of the spin-screening effect in superconductor/ferromagnet mesoscopic structures by NMR (invited)

10 International Meeting on Hole Burning, Single Molecule and Related Spectroscopies: Science Applications (HBSM 2009), June 22–27, 2009, Palm Cove, Australia

Moiseev S.A., Tittel W.: Raman-echo quantum memory (invited)

Fifth International Conference on Materials for Advanced Technologies (ICMAT 2009), June 28–July 3, 2009, Singapore, Singapore

Suleimanov N., Khantimerov S., Kukovitsky E., Scheuermann R., Herlach D.: Methanol-to-hydrogen decomposition and electrochemical hydrogen absorption in carbon nanostructured materials (oral)

XXI Международная конференция "Новое в магнетизме и магнитных материалах" (HMMMXXI), 28 июня–4 июля 2009, Москва, Россия

Ерёмина Р.М., Яцык И.В., Фазлижанов И.И., Шарипов К.Р., Муковский Я.М., Пятаев А.В., Глазырин К.В.: Исследование фазового расслоения в керамике $\text{Eu}_{0.6}\text{La}_{0.4-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($x = 0.1; 0.13; 0.15; 0.17; 0.2; 0.3$) (устн.)

Ерёмина Р.М., Ерёмин М.В.: О соотношении между частотами магнитного резонанса и главными значениями тензора магнитной восприимчивости в кристаллах с низкой симметрией (стенд.)

International Symposium and Summer School "Nuclear Magnetic Resonance in Condensed Matter", 6 Meeting "NMR in Heterogeneous Systems", June 29–July 3, 2009, St. Petersburg, Russia

Kupriyanova G., Mozzhukhin G.V., Doğan N., Rameev B., Aktaş B.: The NMR detection in low magnetic field (invited)

Mozzhukhin G.V., Rameev B., Doğan N., Öneren Ö., Aktaş B., Kupriyanova G.: Nuclear quadrupole resonance of ^{14}N nuclei in low magnetic field (invited)

Gabidullin D.D., Biktimirov E.F.: Radiofrequency synthesizer design for magnetic resonance imaging system with ultralow magnetic field (poster)

Gafiyatullin N.M., Biktimirov E.F.: Hardware for MR tomography TMR-KFTI which allows to get the image of slices oriented arbitrary (poster)

Mozzhukhin G.V., Doğan N., Öneren Ö., Rameev B., Khusnutdinov R., Kupriyanova G., Moltchanov S.V.: Nuclear quadrupole resonance experiment of ^{14}N nuclei for remote detection with use of the planar coil without shielding (poster)

EUROMAR-2009: Magnetic Resonance Conference, July 5–9, 2009, Göteborg, Sweden

Eremina R., Fazlizhanov I., Mukovskii Ya.: ESR studies of $\text{Eu}_{0.6}\text{La}_{0.4-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ magnetic subsystem separation (poster)

Konovalov A.A., Tarasov V.F., Zharikov E.V.: High-frequency EPR spectroscopy synthetic forsterite crystals by doped Cr, Li ions after irradiation (poster)

XVI International Symposium on High Resolution Molecular Spectroscopy (HighRus-2009), July 5–10, 2009, Irkutsk, Russia

Karimullin K.R., Vainer Yu.G., Naumov A.V., Eremchev I.Yu.: Ultrafast relaxation dynamics in doped polymers: study by means of incoherent photon echo with femtosecond temporal resolution (oral)

18 International Laser Physics Workshop (LPHYS'09), July 13–17, 2009, Barcelona, Spain

Amari A., Walther A., Kröll S., Kalachev A.: Superradiance and slow light effects for quantum memories (oral)

Kalachev A.A.: Pulse shaping during narrowband cavity-enhanced spontaneous parametric down-conversion (oral)

Kalashnikov D.A., Katamadze K.G., Kulik S.P.: The inhomogeneous broadening of the biphoton spectrum by introducing temperature gradient in nonlinear crystal (poster)

Четвёртая международная научная школа “Наука и инновации-2009” (ISS “SI-2009”): Четвёртый международный научный семинар “Фундаментальные исследования и инновации” и Всероссийский молодёжный научный семинар “Наука и инновации-2009”, 18–24 июля 2009, Йошкар-Ола, Россия

Самарцев В.В.: Твёрдотельные оптические эхо-процессоры (приглашён.)

Каримуллин К.Р.: Некогерентное фотонное эхо как метод исследования быстропротекающих процессов в биологических и технологических средах (устн.)

Moiseev S.A., Tittel W.: Optical quantum memory with generalized time-reversible atom-light interactions (oral)

Степанов А.Л.: Нелинейные оптические свойства материалов с металлическими наночастицами (устн.)

Воробьёва В.Е., Самарцев В.В.: Использование модели Хопфилда-Литтла для создания процессоров нового типа (стенд.)

Воробьёва В.Е., Самарцев В.В., Шкаликов А.В.: Оптическая эхо-спектроскопия с помощью импульсов различной длительности в условиях селективного возбуждения (стенд.)

51 Rocky Mountain Conference on Analytical Chemistry, July 19–23, 2009, Snowmass, USA

Konovalov A.A., Tarasov V.F., Mosina L.V.: Potential of tunable high-frequency EPR spectroscopy in the identification of impurity Cr^{3+} ions in synthetic forsterite (poster)

International Conference on the Applications of the Mössbauer Effect (ICAME'09), July 19–24, 2009, Vienna, Austria

Shakhmuratov R.N., Vagizov F., Sadykov E., Odeurs J., Kocharovskaya O.: Single gamma-photon propagation in a medium with a doublet structure (poster)

20 International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces (ICMFS-2009), July 20–24, 2009, Berlin, Germany

Rameev B., Akdogan N., Güler S., Aktaş B., Zabel H., Nefedov A., Khaibullin R.I., Tagirov L.: FMR studies of Co-implanted ZnO thin films (poster)

Sale A.G., Kazan S., Gatiyatova Ju.I., Valeev V.F., Khaibullin R.I., Mikailzade F.A.: Magnetic resonance studies of Fe implanted BaTiO_3 (poster)

9 International Conference on Research in High Magnetic Fields (RHMF 2009), July 22–25, 2009, Dresden, Germany

Arango Y., Kataev V., Vavilova E., Popa A., Hellmann I., Klingeler R., Täschner C., Büchner B.: High field magnetic resonance studies of the nanoscale spin magnet VOx-nanotubes (poster)

Yehia M., Vavilova E., Kataev V., Klingeler R., Volkova O., Lapsheva E., Shutov V., Savelieva O., Vasiliev A.N., Büchner B.: High field ESR study of the new low dimensional $S = 1/2$ system: $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (poster)

International Conference on Magnetism (ICM-2009), July 26–31, 2009, Karlsruhe, Germany

Gor'kov L.P., Teitel'baum G.B.: Microscopical phase separation in iron pnictides: what is in common to cuprates? (oral)

Kataev V., Alfonsov A., Vavilova E., Büchner B., Podlesnyak A., Russina M., Furrer A., Strassle Th., Pomjakushina E., Conder K., Khomskii D.I.: Nature of the hole-induced spin polarons in LaCoO_3 (oral)

Kataev V., Alfonsov A., Vavilova E., Büchner B., Podlesnyak A., Russina M., Furrer A., Strassle Th., Pomjakushina E., Conder K., Khomskii D.I.: Frustrated magnet $\text{Li}_2\text{CuZrO}_4$ – paramagnetism meets paraelectricity (poster)

Goryunov Yu., Altshuler T., Shitsevalova N., Dukhnenko A.: Magnetic phase separation and magnetic ordering in $\text{EuB}_{5.93}\text{C}_{0.07}$ (poster)

Goryunov Yu., Shitsevalova N., Dukhnenko A.: Effect of anisotropy in temperature dynamics of magnetic phase separation in europium hexaboride (poster)

Panarina N., Talanov Yu., Shaposhnikova T., Beysengulov N., Vavilova E., Kataev V., Behr G., Kondrat A., Hess C., Leps N., Klingeler R., Büchner B.: Microwave absorption measurements of polycrystalline $\text{SmO}_{1-x}\text{F}_x\text{FeAs}$ (poster)

Validov A.A., Lavrentyeva E.M., Ozerov M., Zvyagin S.A., Turnbull M.M., Landee C.P., Teitel'baum G.B.: Quantum critical dynamics of $S = 1/2$ antiferromagnetic heisenberg chains studied in CuPzN by ESR (poster)

XIII European Symposium for Biology Student of Europe "SymBioSE-2009", July 30–August 8, 2009, Kazan, Russia

Gainutdinov Kh.L.: Cellular and molecular mechanisms of forming and retention of long-term memory in a simple systems (invited)

11 International Symposium on Spin and Magnetic Field Effects in Chemistry and Related Phenomena (SMC09), August 9–14, 2009, St. Catharines, Canada

Kandrashkin Yu.E., Salikhov K.M.: Numerical simulation of quantum teleportation in photosynthetic reaction centers (invited)

7 Meeting of European Federation of EPR Groups and COST-15, August 9–14, 2009, Antwerpen, Belgium

Salikhov K.M.: Contributions of exchange and dipole-dipole interactions to the shape of EPR spectra of free radicals in diluted solutions (invited)

International Conference on Nanomaterials and Nanosystems (NanoMats2009), August 10–13, 2009, Istanbul, Turkey

Güler S., Rameev B., Khaibullin R.I., Khakimova R.R., Aktaş B.: Ferromagnetic resonance study of cobalt implanted ZnO (poster)

Sale A.G., Kazan S., Gatiatova Ju.I., Valeev V.F., Khaibullin R.I., Mikailzade F.A.: Magnetic resonance studies of Fe implanted BaTiO_3 (poster)

XI International Conference "Hydrogen Materials Science & Chemistry of Carbon Nanomaterials" (ICHMS-2009), August 25–31, 2009, Yalta, Ukraine

Suleimanov N.M., Khantimerov S.M., Kukovitsky E.F., Scheuermann R., Herlach D., Locshin A.A., Gnezdilov O.I., Matukhin V.L.: Methanol (ethanol) to hydrogen decomposition on carbon-metal nanostructured composites (oral)

Khantimerov S.M., Suleimanov N.M., Kukovitsky E.F., Gnezdilov O.I., Matukhin V.L., Sakhratov Y.A.: Investigation of electrochemically hydrogenated carbon nanotubes (poster)

4 International Workshop on Polymer/Metal Nanocomposites, September 2–4, 2009, Prague, Czech Republic

Gumarov G.G., Akhmetov M.M., Petukhov V.Yu., Zheglov E.P., Konygin G.N., Zaripov R.B.: EPR study of nano-dispersed calcium gluconate (poster)

Gumarov G.G., Gumarov A.I., Petukhov V.Yu., Khabibullina N.R., Valeev V.F.: Magnetic properties of silicide nanoparticles ion-beam-synthesized in the external magnetic field (poster)

NATO Advanced Research Workshop "Quantum Cryptography and Computing: Theory and Implementation", September 9–12, 2009, National Quantum Information Center of Gdansk, University of Gdansk, Gdansk, Poland

Moiseev S.A.: Optical quantum computing based on low loss surface polaritons (invited)

IX East European Conference of the International Society for Invertebrate Neurobiology "Simpler Nervous Systems", September 9–13, 2009, St. Petersburg, Russia

Andrianov V.V.: The simple model of defensive reflex's neuronal network in Helix (poster)

Andrianov V.V., Golovchenko A.N., Muranova L.N., Gainutdinov Kh.L.: Comparative study of effects of neuroleptic haloperidol, precursor of dopamine L-DOPA and neurotoxic analogue of dopamine 6-OHDA on the behavioural reactions of snail during long-term sensitization (poster)

Gainutdinov Kh.L., Andrianov V.V., Gainutdinova T.Kh.: Excitability increase in withdrawal interneurons correlated with elaboration and retention of defensive reflex conditioning in snail (poster)

Gainutdinova T.Kh., Silantyeva D.I., Andrianov V.V., Gainutdinov Kh.L.: Effects of antibodies to Ca-binding S100B protein on membrane structures of premotor interneurons of snail during defensive reflex conditioning (poster)

Golovchenko A.N., Gainutdinova T.Kh., Muranova L.N., Silantyeva D.I., Gainutdinov Kh.L.: Effects of chronic injection of caffeine and inhibitor of phosphodiesterase IBMX on electrical characteristics of premotor interneurons during conditioning in grape snail (poster)

Kanakotina I.B., Tagirova R.R., Gainutdinov Kh.L.: Participations of protein biosyntheses on single session context learning in terrestrial snail (poster)

Muranova L.N., Gainutdinov Kh.L.: Influence of neuroleptic haloperidol, precursor of dopamine L-DOPA and neurotoxic analogue of dopamine 6-OHDA on the defensive reflex conditioning of the terrestrial snail (poster)

Tagirova R.R., Kanakotina I.B., Gainutdinov Kh.L.: Effects of serotonin receptors inhibitor methiothepin on elaboration of context conditioning in grape snail (poster)

Timoshenko A.Kh., Andrianov V.V., Gainutdinova T.Kh., Kanakotina I.B., Tagirova R.R., Shtark M.B., Epstein O.I., Gainutdinov Kh.L.: Changes of electrical characteristics of premotor interneurons and role of serotonin during protector effect of antibodies to Ca-binding S100 protein on elaboration of long-term sensitization in snail (poster)

6 National Scientific Conference with International Participation "Reactive Oxygen Species, Nitric Oxide, Antioxidants and Human Health", September 14–18, 2009, Smolensk, Russia

Gainutdinov Kh.L., Andrianov V.V., Jafarova G.G.: Changes in nitric oxide contents during adaptation to stress influences: hypokinesia, sympathectomy and ischemic insult in rats – investigation by EPR spectroscopy (oral)

Andrianov V.V., Koshelev V.B., Iyudin V.S., Gavrilova S.A., Golubeva A.V., Gainutdinova T.Kh., Timoshenko A.Kh., Jafarova G.G., Gainutdinov Kh.L.: Distribution of nitric oxide production in blood and brain of rat (poster)

Andrianov V.V., Yurtaeva S.V., Iyudin V.S., Gainutdinov Kh.L.: To methods of EPR-measurements of the oxides nitrogen's contents in biological tissues (poster)

Gainutdinov Kh.L., Koshelev V.B., Gavrilova S.A., Golubeva A.V., Jafarova G.G., Andrianov V.V., Gainutdinova T.Kh., Iyudin V.S., Timoshenko A.Kh.: Changes of nitric oxide content in various parts of brain of rat after insult (poster)

Iyudin V.S., Sitdikov F.G., Andrianov V.V., Gilmutdinova R.I., Karimov F.K., Muranova L.N., Chiglintsev V.M., Yurtaeva S.V., Jafarova G.G., Gainutdinov Kh.L.: Investigation of nitric oxide contents in heart tissue of sympathectomized rats of different ages by EPR spectroscopy (poster)

Jafarova G.G., Chiglintsev V.M., Andrianov V.V., Gilmutdinova R.I., Iyudin V.S., Muranova L.N., Sitdikov F.G., Yurtaeva S.V., Gainutdinov Kh.L.: Changes in nitric oxide contents in heart tissue of rats in postnatal ontogenesis in conditions of hypokinesia (poster)

Jafarova G.G., Koshelev V.B., Gavrilova S.A., Golubeva A.V., Andrianov V.V., Gainutdinova T.Kh., Iyudin V.S., Timoshenko A.Kh., Gainutdinov Kh.L.: Influence of peptide Semaks on changes of nitric oxide content in blood of rats after insult (poster)

XII Международный, междисциплинарный симпозиум "Порядок, беспорядок и свойства оксидов" (ODPO-12), 17–22 сентября 2009, Ростов-на-Дону, Россия

Торгашев В.И., Жукова Е.С., Горшунов Б.П., Аксёнов Н.П., Прохоров А.С., Шакуров Г.С., Пестряков Е.В.: Терагерцовая ИК-спектроскопия молекул воды в структурных каналах берилла ($\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$) (стенд.)

VIII Международная конференция "Взаимодействие излучений с твёрдым телом" (ВИТТ-2009), 23–25 сентября 2009, Минск, Беларусь

Бринкевич Д.И., Вабищевич С.А., Валеев В.Ф., Волобуев В.С., Нажим Ф.А., Лукашевич М.Г., Хайбуллин Р.И., Оджаев В.Б.: Модификация приповерхностных слоёв полиэтилентерефталата и полиимида имплантацией ионов никеля (стенд.)

Нажим Ф.А., Лукашевич М.Г., Базаров В.В., Хайбуллин Р.И., Оджаев В.Б.: Магнитотранспортные характеристики полиимида, имплантированного ионами кобальта и меди (стенд.)

17 IEEE International Conference on Advanced Thermal Processing of Semiconductors (RTP 2009), September 29–October 2, 2009, Albany, NY, USA

Bayazitov R.M.: Heating and photoionization of silicon structures at laser treatments (invited)

Bayazitov R.M.: History of laser annealing in Russia (invited)

Bayazitov R.M., Batalov R.I.: Formation of Si-based light-emitting structures by ion implantation and pulsed treatments (invited)

XII International Youth Scientific School "Actual Problems of Magnetic Resonance and Its Application", October 4–9, 2009, Kazan, Russia

Teitel'baum G.B.: NMR zooming into the properties of the iron based high temperature superconductors (invited)

Bakirov M.M., Sukhanov A., Baniodeh A., Voronkova V., Novitchi G., Anson C.E., Powell A.K.: EPR investigation of the spin-spin interaction in the Fe_2Y_2 cluster (oral)

Ivanshin V.A., Litvinova T.O., Sukhanov A.A., Sokolov D.A., Aronson M.C.: Electron spin resonance in the Heusler alloy YbRh_2Pb (oral)

Konov K.B., Voronkova V.K., Zaripov R.B.: Determination of spin state of the paramagnetic clusters by electron spin echo envelope modulation (oral)

Sharipov K.R., Eremina R.M., Fazlizhanov I.I., Krug von Nidda H.-A., Mukovskii Yu.M.: Observation of a phase separation in paramagnetic $\text{Eu}_{0.6}\text{La}_{0.4-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ (oral)

Zaripov R.B., Aminova R.M., Salikhov K.M., Konygin G.N., Gumarov G.G.: Application of ESEEM to study free radicals in disordered systems (oral)

International Conference "Micro- and nanoelectronics-2009" (ICMNE-2009), October 5–9, 2009, Zvenigorod, Russia

Bukharaev A., Biziaev D., Borodin P., Merkutov I.: Modification of magnetic domain structures in Co film using the atomic force microscopy nano-oxidation (poster)

Fattakhov Ya., Galyautdinov M., Farrakhov B., Zakharov M.: Measurements samples temperature and dynamics of recrystallization of implanted silicon at rapid thermal processing (poster)

Второй международный форум по нанотехнологиям, 6–8 октября 2009, Москва, Россия

Насыров И.К., Халитов З.Я., Осин Ю.Н., Валеева Д.Н.: Диагностика цилиндрических и спиральных нанотрубок (устн.)

Гатиятов Р.Г., Лисин В.Н., Бухараев А.А.: Нелинейный транспорт электронов в наноконтактах металлов при комнатной температуре (стенд.)

Orbital Workshop, October 7–8, 2009, Berlin, Germany

Kataev V., Alfonso A., Vavilova E., Büchner B., Podlesnyak A., Russina M., Furrer A., Strässle Th., Pomjakushina E., Conder K., Khomskii D.I.: Hole-induced spin polarons in LaCoO_3 (oral)

IX Международная научная конференция “Химия твёрдого тела: монокристаллы, наноматериалы, нанотехнологии”, 11–16 октября 2009, Кисловодск, Россия

Сулейманов Н.М., Файзрахманов И.А., Хантимеров С.М.: Синтез и исследование углерод-палладиевых нанокompозитных плёнок (стенд.)

V International Symposium “Design and Synthesis of Supramolecular Architectures”, October 12–16, 2009, Kazan, Russia
Gruzdev M., Lattermann G., Morozov V., Domracheva N.: Photoactive properties of self-organizing iron-containing dendrimers (poster)

13 European Conference on Applications of Surface and Interface Analysis (ECASIA'09), October 18–23, 2009, Antalya, Turkey

Aktaş B., Rameev B.: Ferromagnetic resonance studies of magnetic multilayers (oral)

Rameev B., Akdogan N., Aktaş B., Khaibullin R.I.: FMR studies of local magnetic properties of thin films for spintronics (poster)

VI Международная конференция молодых учёных и специалистов “Оптика-2009”, 19–23 октября 2009, Санкт-Петербург, Россия

Иванин К.В., Леонтьев А.В., Лобков В.С., Пугцлис А., Ризо П.Й., ван Лоосдрехт П.Х.М.: Исследование электронной и спиновой динамики в 2DEG методами магнитооптической спектроскопии (устн.)

Шмелёв А.Г., Леонтьев А.В., Никифоров В.Г., Сафиуллин Г.М., Лобков В.С.: К вопросу об управлении колебательно-вращательной динамикой молекул (устн.)

Галютдинов М.Ф., Фаррахов Б.Ф., Фаттахов Я.В., Захаров М.В.: Исследование динамики нагрева и твёрдофазной рекристаллизации имплантированных полупроводников методом оптической дифракции при облучении световыми импульсами (стенд.)

Леонтьев А.В., Иванин К.В., Лобков В.С., Салихов К.М., Самарцев В.В., Сафиуллин Г.М.: Исследование кристалла CdS методом четырёхволнового смешения (стенд.)

IV Международная научная конференция “Актуальные проблемы физики твёрдого тела” (ФТТ-2009), 20–23 октября 2009, Минск, Беларусь

Богданова Х.Г., Булатов А.Р.: Решёточные, электрические и магнитные эффекты в манганитах лантана $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($x = 0.125; 0.15; 0.175$) (устн.)

Волобуев В.С., Бумай Ю.А., Лукашевич М.Г., Нажим Ф.А., Нуждин В.И., Хайбуллин Р.И., Оджаяев В.Б.: Оптические характеристики металлополимерных композитов, синтезированных имплантацией серебра в ПЭТ и ПИ (стенд.)

Najim F.A., Lukashevich M.G., Khaibullin R.I., Nuzhdin V.I., Odzhaev V.B.: DC and AC electric characterization of PI foils implanted by Cu ions (poster)

VII Международная конференция “Молекулярная генетика соматических клеток”, 22–25 октября 2009, Звенигород, Россия

Гайнутдинов Х.Л., Андрианов В.В., Гайнутдинова Т.Х., Гаврилова С.А., Голубева А.В., Давыдова М.П., Юдин В.С., Тимошенко А.Х., Яфарова Г.Г., Кошелев В.Б.: Изменение интенсивности продукции оксида азота является одним из ключевых звеньев клеточных поражений в тканях мозга, сердца и в крови крыс: исследование методом ЭПР-спектроскопии (устн.)

Тринадцатая международная молодёжная научная школа “Когерентная оптика и оптическая спектроскопия”, 26–28 октября 2009, Казань, Россия

Моисеев С.А.: Новые возможности квантовой памяти на фотонном эхе (приглашён.)

Степанов А.Л.: Плазменная нанооптика (приглашён.)

Васильченко В.Е., Калачёв А.А.: Компенсация фазовой релаксации при сжатии световых импульсов во времени и режиме фотонного эха (устн.)

Голубев А.Н., Никитин С.И., Степанов А.Л.: Нелинейно-оптическое поглощение наночастиц меди в кварцевом стекле (устн.)

Калачёв А.А., Петрова А.В.: Оптическое сверхизлучение на кооперативных переходах (устн.)

Калачёв А.А., Сербиненко В.О.: Бифотонная спектроскопия сверхизлучательного рассеяния света (устн.)

Каримуллин К.Р.: Исследование динамики оптических спектров примесных центров в кристаллических и аморфных матрицах методами когерентного и некогерентного фотонного эха (устн.)

Христофорова Д.А., Калачёв А.А.: Многоканальная память на основе фотонного эха в системах с управляемым неоднородным уширением резонансного перехода (устн.)

Арсланов Н.М., Моисеев С.А., Камили А.: Слабозатухающие поверхностные поляритоны в структурах из метаматериалов (стенд.)

Воробьёва В.Е., Калачёв А.А., Самарцев В.В.: Ассоциативные свойства фотонного эха при многоимпульсных режимах возбуждения (стенд.)

Иванин К.В., Леонтьев А.В., Лобков В.С.: Исследования подвижности электронов в кремнии методом нелинейной спектроскопии (стенд.)

Латыпов И.З., Калинин А.А., Шкаликов А.В., Калачёв А.А., Самарцев А.А.: Получение узкополосных поляризационно-перепутанных состояний света в резонаторе (стенд.)

Михайлов А.Е., Петрушкин С.В.: Температура и эффективность лазерного охлаждения кристаллов, легированных редкоземельными ионами (стенд.)

Нефёдова К.Л., Калачёв А.А.: Частотно-угловой спектр спонтанного параметрического рассеяния в кристалле йодата лития (стенд.)

Тиранов А.Д., Каримуллин К.Р., Самарцев В.В.: Моделирование спектров сигналов фотонного эха в кристаллах с высокой концентрацией примесных ионов (стенд.)

Фаррахов Б.Ф., Галаяутдинов М.Ф., Фаттахов Я.В., Захаров М.В.: Методика лазерной диагностики структурно-фазовых превращений на поверхности полупроводников (стенд.)

Фаттахова Ю.З., Калачёв А.А.: Особенности СПР от импульсной накачки в резонаторе (стенд.)

IX Международный симпозиум по фотонному эхо и когерентной спектроскопии (ФЭКС'2009), 26–31 октября 2009, Казань, Россия

Валишин Ф.Т., Валишин Н.Т., Моисеев С.А.: О траекторно-волновой природе атома водорода (приглащён.)

Калачёв А.А., Кроль С.: Оптическая квантовая память на основе перестраиваемых резонаторов (приглащён.)

Одюрс Дж., Шахмуратов Р.Н.: Распространение одиночного фотона в резонансной среде (приглащён.)

Петрушкин С.В.: Перспективы оптического охлаждения наноматериалов (приглащён.)

Сафиуллин Г.М., Никифоров В.Г., Лобков В.С., Самарцев В.В., Леонтьев А.В.: Фемтосекундный эхо-процессинг в полимерной плёнке, допированной красителем при комнатной температуре (приглащён.)

Власова Д.Д., Калачёв А.А.: Кооперативные эффекты в примесных нанокристаллах (устн.)

Иванин К.В., Леонтьев А.В., Лобков В.С., Никифоров В.Г., Салихов К.М., Самарцев В.В., Сафиуллин Г.М.: Спектроскопия четырёхволнового смешения на кристалле CdS при комнатной температуре (устн.)

Калачёв А.А., Каримуллин К.Р., Самарцев В.В., Зуйков В.А.: Оптическая эхо-спектроскопия высококонцентрированного кристалла Tm:YAG (устн.)

Калинкин А.А., Калачёв А.А., Латыпов И.З., Самарцев В.В., Шкаликов А.В.: Генерация перепутанных состояний света в процессе параметрического рассеяния в резонаторе (устн.)

Лисин В.Н., Шегеда А.М.: Фото-фононная томография оптически активных примесных центров в лазерных кристаллах (устн.)

Михайлов А.Е., Петрушкин С.В.: Температура и эффективность лазерного охлаждения кристаллов легированных редкоземельными ионами (устн.)

Фаттахова Ю.З., Калачёв А.А.: Генерация фотонов с контролируемой временной формой в процессе спонтанного параметрического рассеяния от импульсной накачки (устн.)

Хасанов О.Х., Федотова О.М., Лобков В.С., Самарцев В.В., Сафиуллин Г.М.: Вопросы теории фемтосекундного эха в легированных полимерных плёнках при комнатной температуре (устн.)

Арсланов Н.М., Моисеев С.А.: “Магнитные” и “электрические” световые волны в метаматериалах (стенд.)

Беспалов В.Г., Крылов В.Н., Самарцев В.В., Шкаликов А.В.: Оптическое параметрическое усиление в нелинейных кристаллах при фемтосекундной накачке (стенд.)

Воробьёва В.Е., Калачёв А.А., Самарцев В.В.: Ассоциативные свойства фотонного эха при многоимпульсных режимах возбуждения (стенд.)

Галаяутдинов М.Ф., Фаррахов Б.Ф., Фаттахов Я.В., Захаров М.В.: Исследование методом оптической дифракции динамики нагрева и рекристаллизации полупроводников при облучении их мощными световыми импульсами (стенд.)

Иванин К.В., Леонтьев А.В., Лобков В.С., Салихов К.М., Самарцев В.В.: Исследование спиновой динамики в 2DEG методами нелинейной спектроскопии (стенд.)

Калачёв А.А., Калинкин А.А., Латыпов И.З., Самарцев В.В., Шкаликов А.В.: Бифотонная спектроскопия примесных кристаллов (стенд.)

Каримуллин К.Р., Тиранов А.Д., Зуйков В.А., Митрофанова Т.Г., Самарцев В.В.: Влияние высокой концентрации примеси на генерацию фотонного эха в допированных кристаллах (стенд.)

Сербиненко В.О., Калачёв А.А.: Бифотонная спектроскопия сверхизлучательного рассеяния (стенд.)

Христофорова Д.А., Калачёв А.А.: Многоканальная память на основе фотонного эха в системах с управляемым неоднородным уширением резонансного перехода (стенд.)

Международная научная конференция “Закономерности развития патологических состояний и их коррекция”, 27–28 октября 2009, Минск, Беларусь

Гаврилова С.А., Голубева А.В., Андрианов В.В., Гайнутдинова Т.Х., Июдин В.С., Тимошенко А.Х., Яфарова Г.Г., Бычкова Е.Ю., Гайнутдинов Х.Л., Кошелев В.Б.: Изменение содержания оксида азота в мозге крыс в процессе развития фокального ишемического инсульта (устн.)

Гайнутдинов Х.Л., Гаврилова С.А., Голубева А.В., Давыдова М.П., Яфарова Г.Г., Андрианов В.В., Гайнутдинова Т.Х., Июдин В.С., Тимошенко А.Х., Кошелев В.Б.: Изменение интенсивности продукции оксида азота в отделах мозга и в крови крыс после ишемического инсульта: исследование методом ЭПР-спектроскопии (устн.)

Восьмая международная научно-практическая конференция “Образовательные, научные и инженерные приложения в среде LabVIEW и технологии National Instruments-2009”, 20–21 ноября 2009, Москва, Россия

Мигачёв С.А., Садыков М.Ф., Иванов Д.А., Шакирзянов М.М.: Экспериментальная установка для исследования акустооптических явлений в магнитных материалах (устн.)

X Международная научная конференция “Nanotech 2009”, 8–11 декабря 2009, Казань, Россия

Бухараев А.А.: Применение методов атомно-силовой микроскопии для исследования *in vitro* упругих свойств биологических тканей и клеток (устн.)

- Зиганшина С.А., Чукланов А.П., Нургазизов Н.И., Лебедев Д.В., Бухараев А.А.: Атомно-силовая микроскопия и электрокаталитические свойства наночастиц кобальта и никеля (устн.)
- Куковицкий Е.Ф.: Углеродные нанотрубные автоэммитеры с большой плотностью эмиссионного тока (устн.)
- Петухов В.Ю.: Изучение нанодисперсных лекарственных препаратов на основе солей глюконовой кислоты методами магнитной радиоспектроскопии (устн.)

Российские конференции

Всероссийский семинар по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн, 2–5 марта 2009, Нижний Новгород

- Коновалов А.А., Тарасов В.Ф.: Перестраиваемая по частоте ЭПР-спектроскопия в миллиметровом диапазоне (устн.)
- Шакуров Г.С., Пестряков Е.В.: Поляроид субмиллиметрового диапазона на кристалле берилла (устн.)

Всероссийская молодёжная научная конференция “Минералы: строение, свойства, методы исследования”, 16–20 марта 2009, Миасс

- Лопатин О.Н., Бахтин А.И., Хайбуллин Р.И.: Кристаллохимические аспекты ионной имплантации (приглашён.)

XII Всероссийская медико-биологическая научная конференция молодых исследователей “Фундаментальная наука и клиническая медицина”, 18–19 апреля 2009, Санкт-Петербург

- Головченко А.Н., Муранова Л.Н., Гайнутдинова Т.Х.: Эффекты влияния хронического введения IBMX при обучении виноградной улитки на электрические характеристики командных нейронов (стенд.)
- Канакотина И.Б., Тагирова Р.Р., Тимошенко А.Х.: Влияние 5-окситриптофана на протекторный эффект антител к кальций-связывающему белку S100 при формировании долговременной сенситизации у виноградной улитки (стенд.)
- Тагирова Р.Р.: Влияние аппликации водорастворимого аналога цАМФ и ингибитора фосфодиэстеразы IBMX на электрические характеристики командных нейронов после долговременной сенситизации и ассоциативного обучения (стенд.)
- Тимошенко А.Х., Муранова Л.Н., Гайнутдинова Т.Х.: Изменения электрических характеристик командных нейронов при протекторном эффекте антител к белку S100 на формирование долговременной сенситизации виноградной улитки (стенд.)

Всероссийская конференция по электронной микроскопии наноструктур, 18–19 апреля 2009, Владивосток

- Осин Ю.Н.: Сканирующая электронная микроскопия наноструктурированных поверхностей (приглашён.)

Третья всероссийская конференция по наноматериалам (НАНО2009), 20–24 апреля 2009, Екатеринбург

- Петров Д.А., Серёдкин В.А., Воротынова О.В., Иванцов Р.Д., Эдельман И.С., Валеев В.Ф., Файзрахманов И.А., Хайбуллин Р.И., Степанов А.Л.: Магнитооптические свойства ионно-синтезированных наночастиц никеля в оксиде кремния (устн.)
- Петраковская Э.А., Иванцов Р.Д., Эдельман И.С., Валеев В.Ф., Файзрахманов И.А., Хайбуллин Р.И., Степанов А.Л.: Магнитный резонанс ионно-синтезированных наночастиц кобальта в матрице SiO₂ (стенд.)
- Селиванова Н.М., Нассар И.М., Галявиев И.Р., Галяметдинов Ю.Г.: Темплатный синтез и фотофизические свойства наночастиц CdS (стенд.)

Всероссийская конференция “Безопасность при использовании наноматериалов и нанотехнологий”, 29–30 апреля 2009, Казань

- Сулейманов Н.М., Хантимеров С.М.: Углеродные нанотрубки как среды для хранения водорода и электрохимических преобразований (устн.)

VI Всероссийский семинар памяти Д. Н. Клышко, 20–22 мая 2009, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва

- Власова Д.Д., Калачёв А.А.: Кооперативные эффекты в примесных нанокристаллах (устн.)
- Калачёв А.А.: Запись и считывание квантовых состояний света с помощью перестраиваемых резонаторов (устн.)
- Калашников Д.А., Катамадзе К.Г., Кулик С.П.: Управление спектром двухфотонного поля: неоднородное уширение спектра за счёт наложения градиента на генерирующий кристалл (устн.)
- Латыпов И.З., Калинин А.А., Шкаликов А.В., Калачёв А.А., Самарцев В.В.: Генерация узкополосных перепутанных состояний света в режиме спонтанного параметрического рассеяния света в резонаторе (стенд.)
- Фаттахова Ю.З., Калачёв А.А.: Особенности бифотонного поля, создаваемого в однорезонаторном параметрическом генераторе с импульсной накачкой (стенд.)

XII Всероссийская научная школа-семинар “Волны-2009”, 25–30 мая 2009, Звенигород

- Воробьева В.Е., Калачёв А.А., Самарцев В.В.: Стимулированное фотонное эхо с временным кодированием данных в режиме Хопфилда-Литтла (устн.)
- Зуйков В.А., Калачёв А.А., Каримуллин К.Р., Самарцев В.В., Тиранов А.Д.: Особенности формирования сигналов фотонного эха в условиях сильного концентрационного тушения (устн.)
- Калинкин А.А., Латыпов И.З., Шкаликов А.В., Калачёв А.А., Самарцев В.В.: Генерация узкополосных перепутанных состояний света в процессе спонтанного параметрического рассеяния света в резонаторе (устн.)

Каримуллин К.Р., Вайнер Ю.Г., Ерёмчев И.Ю., Наумов А.В.: Измерение давления методом микроспектроскопии рубиновых зондов (устн.)

Михайлов А.Е., Петрушкин С.В.: Моделирование процесса лазерного охлаждения в примесном кристалле на основе трёхуровневого и четырёхуровневого приближения (устн.)

Петрушкин С.В.: Размерный эффект для лазерного охлаждения твёрдых тел (устн.)

III Всероссийский национальный конгресс лучевых диагностов и терапевтов “Радиология-2009”, 26–29 мая 2009, Москва

Балакин В.Е., Фаттахов Я.В., Гилязутдинов И.А., Салихов К.М., Юсупова Л.Р., Панов В.О., Хафизов Р.Т., Арсланов А.Р., Сахапова Л.Р., Лутфуллин Р.М.: Исследования эффективности визуализации с применением контрастных веществ в низкополевой томографии (стенд.)

XXI Российская конференция по электронной микроскопии с участием иностранных учёных и учёных из стран СНГ (XXI РКЭМ), 31 мая–3 июня 2009, Черноголовка
Ефимова И.Г., Зиганшин М.А., Горбачук В.В., Солдатов Д.В., Зиганшина С.А., Чукланов А.П., Бухараев А.А.: Образование nanoостровов и нанокристаллитов на поверхности тонких плёнок дипептидов под действием паров органических соединений (стенд.)

Зиганшина С.А., Бухараев А.А., Севастьянов М.Г., Бизяев Д.А., Чукланов А.П.: Изучение с помощью атомно-силовой микроскопии морфологии наночастиц никеля после ионного травления (стенд.)

Лебедев Д.В., Чукланов А.П., Бухараев А.А.: Исследование упругих свойств биологических объектов с помощью специальных зондов АСМ (стенд.)

XII Межрегиональная конференция молодых учёных по физике полупроводниковых, диэлектрических и магнитных материалов (ПДММ-2009), 17–20 июня 2009, Владивосток

Баталов Р.И., Баязитов Р.М., Новиков Г.А., Шустов В.А., Осин Ю.Н.: Образование силицидов в системе Fe/Si под действием импульсных излучений (устн.)

Горошко Д.Л., Галкин Н.Г., Галкин К.Н., Ваванова С.В., Петрушкин И.А., Маслов А.М., Баталов Р.И., Баязитов Р.М.: Рост и оптические свойства гетероструктур Si/CrSi₂/Si со встроенными преципитатами CrSi₂: влияние ионной имплантации, импульсного ионного отжига и молекулярно-лучевой эпитаксии (устн.)

Чусовитин Е.А., Ваванова С.В., Петрушкин И.А., Галкин Н.Г., Баязитов Р.М., Баталов Р.И., Ивлёв Г.Д.: Влияние импульсного лазерного отжига на рост кремния и оптические свойства гетероструктур Si/β-FeSi₂/Si и Si/Ge, изготовленных методами ионной имплантации и молекулярно-лучевой эпитаксии (устн.)

XVI Всероссийская конференция “Структура и динамика молекулярных систем” (Яльчик-2009), 29 июня–4 июля 2009, Йошкар-Ола

Бакиров М.М., Суханов А.А., Воронкова В.К., Новицкий Г.: ЭПР четырёхядерных кластеров Fe₂Y₂ и Fe₂Pr₂ (стенд.)

Волков М.Ю., Салихов К.М.: Реализация квантового алгоритма CNOT с помощью магнитного резонанса (стенд.)

Габидуллин Д.Д., Биктимиров Э.Ф.: Разработка синтезатора радиочастотных импульсов с диапазоном перестройки по частоте 0–150 МГц (стенд.)

Зарипов Р.Б., Джабаров В.И., Князев А.А., Стрелков М.В., Воронкова В.К., Галяметдинов Ю.Г., Салихов К.М.: Определение геометрии нематического комплекса La(III) с помощью импульсного двойного электрон-электронного резонанса (стенд.)

Июдин В.С., Обычный А.А., Салихов К.М., Круппа А.И.: Поляризация электронных спинов в фотодинамических процессах: приложение метода время-разрешённого ЭПР (стенд.)

Кандрашкин Ю.Е., Салихов К.М.: Моделирование квантовой телепортации в реакционных центрах фотосинтеза (стенд.)

Каримуллин К.Р.: Исследование быстрой релаксационной динамики в аморфных примесных средах методом некогерентного фотонного эха (стенд.)

Конов А.Б., Салихов К.М., Галяметдинов Ю.Г., Селиванова Н.М.: ЯМР с импульсным градиентом магнитного поля в приложении к исследованию диффузии в жидком кристалле (стенд.)

Мингалиева Л.В., Воронкова В.К., Галеев Р.Т., Мельник С., Продюс Д., Туртэ К.И.: Обменное взаимодействие и спиновая динамика в соединении {[Nd₂(α-Fur)₆(H₂O)₂]}_n (стенд.)

Обычный А.А., Июдин В.С., Салихов К.М.: Исследование генерации синглетного кислорода при фотодинамической терапии методом ВР ЭПР (стенд.)

Панкратов С.А., Сайкин К.С., Баязитов А.А.: Разработка квадратурного датчика “почки” для низкополевого МР-томографа (стенд.)

Салихов К.М., Фаттахов Я.В., Фахрутдинов А.Р., Анашкин В.Н., Шагалов В.А., Галяметдинов М.К., Биктимиров Э.Ф., Сайкин К.С., Габидуллин Д.Д., Гафиятуллин Н.М.: Медицинский магнитно-резонансный томограф ТМР-0.06-КФТИ – диагностические возможности (стенд.)

Севастьянов М.Г., Бизяев Д.А., Зиганшина С.А., Чукланов А.П., Бухараев А.А.: In-situ АСМ при электрохимическом осаждении никеля (стенд.)

Севастьянов М.Г., Зиганшина С.А., Бизяев Д.А., Чукланов А.П., Бухараев А.А.: Атомно-силовая микроскопия каталитических наночастиц никеля после ионного травления (стенд.)

Всероссийская научная конференция “Устойчивость организмов к неблагоприятным факторам внешней среды”, 24–28 августа 2009, Иркутск

Огородникова А.В., Мухитова Ф.К., Мухтарова Л.Ш., Гнездилов О.И., Гречкин А.Н.: Биосинтез дивиниловых эфиров, продуктов перекисного окисления липидов, в нефотосинтезирующих тканях растений (стенд.)

VI Всероссийская конференция по химии полиядерных соединений и кластеров, посвящённая юбилею акад. И. И. Мусеева, 13–18 сентября 2009, Казань

Sukhanov A., Baniodeh A., Voronkova V., Novitchi G., Anson C.E., Powell A.K.: Synthesis and EPR investigation of new heterometallic tetranuclear FeIII/LnIII clusters (oral)

Иванова Т.А., Овчинников И.В., Туранова О.А.: Кластеризация низкоспиновых комплексов трис-дитиокарбамата Fe(III) в процессе спинового перехода (стенд.)

Туранова О.А., Иванова Г.И., Иванова Т.А., Мингалиева Л.В., Овчинников И.В.: Влияние структуры лигандного окружения на спин-переменные и жидкокристаллические свойства биядерных и моноядерных комплексов железа (III) с пентадентантным основанием Шиффа (стенд.)

XV Всероссийская конференция “Оптика и спектроскопия конденсированных сред”, 20–26 сентября 2009, Краснодар

Герасимов К.И., Фалин М.Л.: Оптическая спектроскопия кластеров Yb³⁺ в монокристаллах SrF₂ (устн.)

Лисин В.Н., Шегеда А.М.: Фото-фононная спектроскопия центров с произвольной оптической плотностью (устн.)

Фалин М.Л., Латыпов В.А.: Лигандное сверхтонкое взаимодействие ионов Yb³⁺ в монокристаллах CsCaF₃ и Cs₂NaYF₆ (устн.)

Шакуров Г.С., Аванесов А.Г., Аванесов С.А.: Тетрагональные и ромбические центры двухвалентного хрома в тройных полупроводниковых соединениях с решёткой халькопирита (устн.)

Шакуров Г.С., Фазлижанов И.И., Шустов В.А., Охримчук А.Г., Личкова Н.В., Загороднев В.Н.: Исследование кристалла RbPb₂Cl₅:Bi методом широкополосной ЭПР-спектроскопии (устн.)

XXI Симпозиум “Современная химическая физика”, 25 сентября–6 октября 2009, Туансе

Бизяев Д.В., Зиганшина С.А., Чукланов А.П., Бухараев А.А., Бизяев Д.В.: Исследование процесса электрохимического осаждения никеля методом атомно-силовой микроскопии in situ (стенд.)

Савостина Л.И., Аминова Р.М.: Изучение динамических процессов в реакциях с участием атома фосфора методами прямой молекулярной динамики (стенд.)

Савостина Л.И., Аминова Р.М.: Компьютерное моделирование механизма реакции взаимодействия производных фосфитов с хлоралем с образованием пятичленных фосфоланов (стенд.)

IV Всероссийская конференция с международным участием “Химия поверхности и нанотехнология”, 28 сентября–4 октября 2009, Хилово, Псковская обл.

Ефимова И.Г., Зиганшин М.А., Горбачук В.В., Солдатов Д.В., Зиганшина С.А., Бухараев А.А.: Самоорганизация тонких плёнок дипептидов L-аланил-L-валина и L-валил-L-аланина под действием паров органических соединений (стенд.)

VII Всероссийская конференция с международным участием “Механизмы функционирования висцеральных систем”, посвящённая 160-летию со дня рождения И. П. Павлова, 29 сентября–2 октября 2009, Санкт-Петербург

Гаврилова С.А., Голубева А.В., Басырова Э.Р., Липина Т.В., Фоминых Е.С., Вареник Е.Н., Гайнутдинов Х.Л., Андрианов В.В., Яфарова Г.Г., Шорникова М.В., Ченцов Ю.С., Кошелев В.Б.: Защита мозга и сердца от ишемических повреждений с помощью пролинсодержащего пептида Семакс (устн.)

XXXV Совещание по физике низких температур, 29 сентября–2 октября 2009, Черногловка

Иванова Т.А., Туранова О.А., Овчинников И.В.: Особенности спинового перехода в трис-дитиокарбаматах Fe (III) (стенд.)

Научно-техническая конференция “Вакуумная наука и техника”, 4–11 октября 2009, Сочи

Куковицкий Е.Ф., Львов С.Г.: Углеродные нанотрубные автокатоды на никелевых ядрах (устн.)

8 Всероссийская конференция с элементами молодёжной научной школы “Материалы нано-, микро-, оптоэлектроники и волоконной оптики: физические свойства и применение” (ВНКШ-2009), 5–8 октября 2009, Саранск

Голубев А.Н., Никитин С.И., Степанов А.Л.: Исследование нелинейно-оптических свойств SiO₂ с металлическими наночастицами Cu методом Z-сканирования (устн.)

Всероссийская конференция с элементами научной школы для молодых учёных “Структура и динамика молекулярных систем”, 5–8 октября 2009, Казань

Габидуллин Д.Д., Биктимиров Э.Ф.: Разработка синтезатора радиочастотных импульсов с диапазоном перестройки по частоте 0–150 МГц (стенд.)

Домрачева Н.Е., Морозов В.И., Груздев М.С., Манапов Р.А., Пятаев А.В.: Железосодержащие жидкокристаллические дендримеры и их свойства (стенд.)

Ефимова И.Г., Зиганшин М.А., Горбачук В.В., Зиганшина С.А., Чукланов А.П., Бухараев А.А.: Связывание паров органических соединений тонкими плёнками дипептидов (стенд.)

Обыночный А.А., Июдин В.С., Салихов К.М.: Исследование спектроскопическими методами первичных фотохимических стадий при фотодинамической терапии (стенд.)

Туранова О.А., Иванова Г.И., Иванова Т.А., Гафиятуллин Л.Г., Туранов А.Н., Овчинников И.В.: Спин-переменные комплексы Fe(III) со светочувствительным лигандом (стенд.)

Савостина Л.И., Аминова Р.М., Аганов А.В., Нафикова А.А.: Квантовохимические расчёты пространственной структуры и параметров ЯМР подвижных пятичленных фосфоранов с различной конфигурацией заместителей (стенд.)

Салихов К.М., Фаттахов Я.В., Фахрутдинов А.Р., Анашкин В.Н., Шагало В.А., Галялтинов М.К., Биктимиров Э.Ф., Сайкин К.С., Габидуллин Д.Д., Гафиятуллин Н.М.: Медицинский магнитно-резонансный томограф TMR-0.06-КФТИ – диагностические возможности (устн.)

Всероссийская научная конференция с международным участием “Нанотехнологии в онкологии 2009”, 9–10 октября 2009, Москва

Ибрагимова М.И., Чушников А.И., Моисеев В.Н., Петухов В.Ю., Жеглов Е.П.: Возможности метода ЭПР для диагностики онкоурологической патологии (устн.)

Первая Всероссийская научная конференция “Методы исследования состава и структуры функциональных материалов” (МИССФМ-2009), 11–16 октября 2009, Новосибирск

Салихов К.М.: ЭПР как метод исследования наноскопических систем (пленарн. лекция)

V Всероссийская научно-техническая конференция “Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики” (АНТЭ-09), 12–13 октября 2009, Казань

Черников С.К., Русских И.В.: Комплекс программ для анализа динамики и прочности конструкции автомобиля на вычислительных кластерах (устн.)

Черников С.К., Файзуллин А.М., Ахмадышин А.Н.: Имитационное моделирование при анализе безопасности конструкций грузовых автомобилей (устн.)

Черников С.К., Хамзин А.Г.: Применение метода спектральных представлений в оценке эксплуатационных напряжений конструкций автомобилей (устн.)

V. A. Fock Meeting on Quantum and Computational Chemistry, October 19–23, 2009, Kazan State Technological University, Kazan

Valishin F.T., Valishin N.T., Moiseev S.A.: Trajectory-wave monism of electron nature in hydrogen atom (oral)

Savostina L.I., Aminova R.M.: Theoretical investigation of bimolecular and trimolecular reaction mechanism of phosphites with unsaturated compounds (poster)

Научно-техническая конференция “Низкотемпературная плазма в процессах нанесения функциональных покрытий”, 11–14 ноября 2009, Казань

Файзрахманов И.А.: Применение высокоэнергетичных ионных пучков для модификации материалов (приглашён.)

Вахитов И.Р., Нуждин В.И., Осин Ю.Н., Хайбуллин Р.И.: Модификация поверхностных слоёв рутила (TiO₂) высокоэнергетичными пучками ионов железа (устн.)

Халитов Н.И., Гатиятова Ю.И., Валеев В.Ф., Хайбуллин Р.И.: Модификация структурных, оптических и магнитных свойств титаната бария (BaTiO₃) путём имплантации ионов кобальта (устн.)

Ежегодная научно-практическая конференция “Инновации РАН-2009”, 18–20 ноября 2009, Томск

Салихов К.М., Фаттахов Я.В., Фахрутдинов А.Р., Анашкин В.Н., Шагало В.А., Галялтинов М.К., Биктимиров Э.Ф., Сайкин К.С., Габидуллин Д.Д., Гафиятуллин Н.М.: Создание магнитно-резонансных томографов в КФТИ КазНЦ РАН как инновационный процесс (устн.)

Всероссийская конференция “Влияние атомно-кристаллической и электронной структуры на свойства конденсированных сред”, посвящённая памяти акад. Ю. А. Осипьяна, 24–27 ноября 2009, Черногловка

Баязитов Р.М.: Создание гетероструктур для кремниевой оптоэлектроники в сильно неравновесных условиях роста и примесного легирования (устн.)

Файзрахманов И.А.: Исследование природы оптических и магнитных эффектов в новых типах метаматериалов, формируемых имплантацией ионов металлов в диэлектрические и полупроводниковые матрицы (устн.)

Овчинников И.В., Вишневская Г.П., Иванова Т.А., Домрачева Н.Е., Туранов А.Н., Туранова О.А., Иванова Г.И., Груздев М.С., Пятаев А.В.: Создание жидкокристаллических наноматериалов с фотопереключаемыми оптическими и магнитными (спин-переменными) свойствами (стенд.)

IX Научная конференция молодых учёных, аспирантов и студентов научно-образовательного центра Казанского государственного университета “Материалы и технологии XXI века”, 7–8 декабря 2009, Казань

Зарипов Р.Б., Салихов К.М.: Исследование слабых диполь-дипольных взаимодействий в аморфных системах с помощью импульсного двойного электрон-электронного резонанса (стенд.)

Участие в выставках

Международные выставки

VIII Международная ярмарка технических достижений и торговых переговоров, 4–9 сентября 2009, Цзыбо, Китай

Компьютерная презентация магнитно-резонансного томографа ТМР-0.06-КФТИ.

I Специализированная выставка в рамках X Международной научной конференции “Нанотех 2009”, 8–11 декабря 2009, Казань, Россия

Представлены стенды по применению атомно-силовой микроскопии для исследования *in vitro* упругих свойств биологических тканей и клеток и об уникальном действующем веществе для безопасного лечения патологии обмена кальция – механоактивированный кальция глюконат.

Российские выставки

IV Казанская венчурная ярмарка Инвестиционно-венчурного фонда Республики Татарстан, Российской ассоциации прямого и венчурного инвестирования, Американского фонда гражданских исследований и развития, 23–24 апреля 2009, Казань

Компьютерная презентация магнитно-резонансного томографа ТМР-0.06-КФТИ.

Выставка Второго российского форума “Российским инновациям – российский капитал”, 9–10 июня 2009, Саранск

Совместно с Казанским государственным энергетическим университетом представлен учебно-исследовательский стенд по водородной энергетике. Стенд отмечен дипломом форума.

Гости института

- Арза Закен, сопровождающее лицо, Реховот, Израиль (участие в международной конференции)
- Габитов Ильдар, профессор, Университет Аризоны, Туксон, США (участие в международном симпозиуме)
- Гало Жан-Пьер, доктор, Национальный центр научных исследований, Орсей, Франция (участие в международном симпозиуме)
- Гольдфарб Даниэлла, доктор, Вейцмановский научный институт, Реховот, Израиль (участие в международной конференции)
- Дзюблик Алексей Ярославович, д.ф.-м.н., Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев, Украина (участие в международном симпозиуме)
- Котэ Герд, профессор, Университет Фрайбурга, Фрайбург, Германия (совместные исследования и участие в международной конференции)
- Котэ Зигмут, сопровождающее лицо, Фрайбург, Германия (участие в международной конференции)
- Кузьмин Владимир Семёнович, профессор, Международный государственный экологический университет им. А. Д. Сахарова, Минск, Беларусь (участие в международном симпозиуме)
- Липс Фердинанд, аспирант, Институт Лейбница по физике твёрдого тела и материаловедения, Дрезден, Германия (выступление с докладом на семинаре)

- Мёбиус Клаус, профессор, Свободный университет Берлина, Берлин, Германия (участие в международной конференции)
- Ребане Александр Карлович, профессор, Университет штата Монтаны, Боземан, США (участие в международном симпозиуме)
- Такаши Инушима, доктор, Университет Токаи, Хирацука, Япония (выступление с докладом на семинаре)
- Хасанов Олег Хайруллович, вед. науч. сотр., Объединённый институт физики твёрдого тела и полупроводников НАН Беларуси, Минск, Беларусь (участие в международном симпозиуме)
- Эткинс Питер, профессор, Оксфордский университет, Оксфорд, Великобритания (знакомство с институтом)
- Алдошин Сергей Михайлович, академик, вице-президент РАН, директор Учреждения Российской академии наук Института проблем химической физики РАН, Черноголовка (знакомство с институтом)
- Аминов Линар Кашифович, профессор, Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования “Казанский государственный университет им. В. И. Ульянова-Ленина”, Казань (участие в международном симпозиуме)

- Антипин Игорь Сергеевич, член-корр. РАН, член Президиума КазНЦ РАН, Учреждение Российской академии наук Институт органической и физической химии им. А. Е. Арбузова Казанского научного центра РАН, Казань (участие в выездном заседании Президиума КазНЦ РАН)
- Антонов Владимир Евгеньевич, д.ф.-м.н., Учреждение Российской академии наук Институт физики твёрдого тела РАН, Черноголовка (участие в выездной сессии Научного совета РАН по физике конденсированных сред)
- Ацаркин Вадим Александрович, профессор, Учреждение Российской академии наук Институт радиотехники и электроники РАН, Москва (оппонирование докторской диссертации)
- Багрянская Елена Григорьевна, профессор, Учреждение Российской академии наук Институт “Международный томографический центр” Сибирского отделения РАН, Новосибирск (оппонирование докторской диссертации)
- Башаров Асхат Масхудович, ст. науч. сотр., Российский научный центр “Курчатовский институт” Институт сверхпроводимости и физики твёрдого тела, Москва (участие в международном симпозиуме)
- Башкиров Евгений Константинович, профессор, Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования “Самарский государственный университет”, Самара (участие в международном симпозиуме)
- Белоненко Михаил Борисович, профессор, Научное образовательное учреждение высшего профессионального образования “Волгоградский институт бизнеса”, Волгоград (участие в международном симпозиуме)
- Бирюков Александр Александрович, профессор, Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования “Самарский государственный университет”, Самара (участие в международном симпозиуме)
- Бугай Александр Николаевич, науч. сотр., Учреждение Российской академии наук Институт ядерных исследований РАН, Дубна (участие в международном симпозиуме)
- Булка Генрих Рафаилович, к.г.-м.н., Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования “Казанский государственный университет им. В. И. Ульянова-Ленина”, Казань (чествование М. М. Зарипова)
- Васильев Николай Александрович, доцент, Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена, Санкт-Петербург (участие в международном симпозиуме)
- Вайнер Юрий Григорьевич, профессор, Учреждение Российской академии наук Институт спектроскопии РАН, Троицк (участие в международном симпозиуме)
- Василевский Сергей Францевич, профессор, Учреждение Российской академии наук Институт химической кинетики и горения Сибирского отделения РАН, Новосибирск (совместные исследования)
- Вахрушев Сергей Борисович, д.ф.-м.н., Учреждение Российской академии наук Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург (участие в выездной сессии Научного совета РАН по физике конденсированных сред)
- Виноградов Евгений Андреевич, член-корр. РАН, директор института, Учреждение Российской академии наук Институт спектроскопии РАН, Троицк (участие в международном симпозиуме)
- Волк Татьяна Рафаиловна, профессор, Учреждение Российской академии наук Институт кристаллографии им. А. В. Шубникова РАН, Москва (участие в выездной сессии Научного совета РАН по физике конденсированных сред)
- Вязовский Михаил Валентинович, к.ф.-м.н., Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования “Волгоградский государственный педагогический университет”, Волгоград (участие в международной конференции)
- Гайнутдинов Ренат Хамитович, профессор, Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования “Казанский государственный университет им. В. И. Ульянова-Ленина”, Казань (участие в международном симпозиуме)
- Галкин Николай Геннадьевич, профессор, Учреждение Российской академии наук Институт автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения РАН, Владивосток (совместные исследования)
- Глазов Сергей Юрьевич, к.ф.-м.н., Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования “Волгоградский государственный педагогический университет”, Волгоград (участие в международной конференции)
- Глезер Александр Маркович, профессор, директор Института металлофизики и функциональных материалов Федерального государственного унитарного предприятия “Центральный научно-исследовательский институт чёрной металлургии им. И. П. Бардина”, Москва (участие в выездной сессии Научного совета РАН по физике конденсированных сред)
- Голенищев-Кутузов Вадим Алексеевич, профессор, Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования “Казанский государственный энергетический университет”, Казань (чествование М. М. Зарипова)
- Горохов Александр Васильевич, профессор, Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования “Самарский государственный университет”, Самара (участие в международном симпозиуме)

- Гречкин Александр Николаевич, академик, член Президиума КазНЦ РАН, директор Учреждения Российской академии наук Казанского института биохимии и биофизики Казанского научного центра РАН, Казань (участие в выездном заседании Президиума КазНЦ РАН)
- Губайдуллин Дамир Анварович, член-корр. РАН, зам. председателя по научной работе Учреждения Российской академии наук Казанского научного центра РАН, директор Учреждения Российской академии наук Института механики и машиностроения Казанского научного центра РАН, Казань (участие в выездном заседании Президиума КазНЦ РАН)
- Даштиев Максим Идрисович, руководитель подразделения ЭПР Брукер БиоСпин, Москва (знакомство с институтом)
- Дзюба Сергей Андреевич, профессор, директор Учреждения Российской академии наук Института химической кинетики и горения Сибирского отделения РАН, Новосибирск (участие в международной конференции)
- Ельцов Константин Николаевич, к.ф.-м.н., Учреждение Российской академии наук Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Москва (участие в выездной сессии Научного совета РАН по физике конденсированных сред)
- Елютин Сергей Олегович, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования “Национальный исследовательский ядерный университет (Московский инженерно-физический институт)”, Москва (участие в международном симпозиуме)
- Ерёмин Михаил Васильевич, профессор, Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования “Казанский государственный университет им. В. И. Ульянова-Ленина”, Казань (участие в международных конференциях и чествовании М. М. Зарипова)
- Жариков Евгений Васильевич, профессор, Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева, Москва (участие в выездной сессии Научного совета РАН по физике конденсированных сред)
- Жданов Ренат Ибрагимович, профессор, Учреждение Российской академии медицинских наук НИИ общей патологии и патофизиологии РАМН, Москва (совместные исследования)
- Жидомиров Георгий Михайлович, профессор, академик РАЕН, Учреждение Российской академии наук Институт катализа им. Г. К. Борескова Сибирского отделения РАН, Новосибирск (совместные исследования)
- Жихарев Валентин Александрович, профессор, Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования “Казанский государственный технологический университет”, Казань (оппонирование кандидатской диссертации)
- Задков Виктор Николаевич, д.ф.-м.н., Международный учебно-научный лазерный центр Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования “Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова”, Москва (планирование совместных мероприятий)
- Зарипов Ринат Герфанович, д.ф.-м.н., член Президиума КазНЦ РАН, зам. директора по научной работе Учреждения Российской академии наук Института механики и машиностроения Казанского научного центра РАН, Казань (участие в выездном заседании Президиума КазНЦ РАН)
- Зиатдинов Альберт Муктасимович, д.ф.-м.н., Учреждение Российской академии наук Институт химии Дальневосточного отделения РАН, Владивосток (участие в международной конференции)
- Знаменский Николай Владимирович, профессор, Российский научный центр “Курчатовский институт” Институт сверхпроводимости и физики твёрдого тела, Москва (участие в международном симпозиуме)
- Изюмов Юрий Александрович, академик, Учреждение Российской академии наук Институт физики металлов Уральского отделения РАН, Екатеринбург (участие в выездной сессии Научного совета РАН по физике конденсированных сред)
- Ильясов Ахат Вахитович, д.ф.-м.н., советник Президиума Академии наук Республики Татарстан, Учреждение Российской академии наук Институт органической и физической химии им. А. Е. Арбузова Казанского научного центра РАН, Казань (чествование М. М. Зарипова)
- Камалова Дина Илевна, профессор, Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования “Казанский государственный университет им. В. И. Ульянова-Ленина”, Казань (участие в международном симпозиуме)
- Карасик Андрей Анатольевич, д.х.н., член Президиума КазНЦ РАН, зам. директора по научной работе Учреждения Российской академии наук Института органической и физической химии им. А. Е. Арбузова Казанского научного центра РАН, Казань (участие в выездном заседании Президиума КазНЦ РАН)
- Карпов Михаил Иванович, профессор, Учреждение Российской академии наук Институт физики твёрдого тела РАН, Черноголовка (участие в выездной сессии Научного совета РАН по физике конденсированных сред)
- Кведер Виталий Владимирович, член-корр. РАН, председатель Научного совета РАН по физике конденсированных сред, директор Учреждения Российской академии наук Института физики твёрдого тела РАН, Черноголовка (участие в выездной сессии Научного совета РАН по физике конденсированных сред)
- Кешнер Татьяна Дмитриевна, к.х.н., гл. спец. Учреждения Российской академии наук Казанского научного центра РАН, Учреждение Российской академии наук Институт органической и физической химии

- им. А. Е. Арбузова Казанского научного центра РАН, Казань (участие в выездном заседании Президиума КазНЦ РАН)
- Клочков Александр Владимирович, к.ф.-м.н., Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования “Казанский государственный университет им. В. И. Ульянова-Ленина”, Казань (участие в международной конференции)
 - Коновалов Александр Иванович, академик, член Президиума КазНЦ РАН, Учреждение Российской академии наук Институт органической и физической химии им. А. Е. Арбузова Казанского научного центра РАН, Казань (чествование М. М. Зарипова)
 - Кочаровская Екатерина Рудольфовна, науч. сотр., Учреждение Российской академии наук Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород (участие в международном симпозиуме)
 - Кочелаев Борис Иванович, профессор, Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования “Казанский государственный университет им. В. И. Ульянова-Ленина”, Казань (чествование М. М. Зарипова)
 - Кузнецов Денис Анатольевич, сервисный инженер подразделения ЭПР Брукер БиоСпин, Москва (знакомство с институтом)
 - Куркин Михаил Иванович, профессор, Учреждение Российской академии наук Институт физики металлов Уральского отделения РАН, Екатеринбург (совместные исследования)
 - Ларионов Николай Владимирович, к.ф.-м.н., Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования “Санкт-Петербургский государственный политехнический университет”, Санкт-Петербург (участие в международной конференции)
 - Лебедев Николай Геннадьевич, профессор, Научное образовательное учреждение высшего профессионального образования “Волгоградский институт бизнеса”, Волгоград (участие в международном симпозиуме)
 - Левченко Александр Алексеевич, д.ф.-м.н., зам. председателя Научного совета РАН по физике конденсированных сред, Учреждение Российской академии наук Институт физики твёрдого тела РАН, Черноголовка (участие в выездной сессии Научного совета РАН по физике конденсированных сред)
 - Леухин Анатолий Николаевич, профессор, Марийский государственный технический университет, Йошкар-Ола (участие в международном симпозиуме)
 - Леушин Анатолий Максимович, к.ф.-м.н., Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования “Казанский государственный университет им. В. И. Ульянова-Ленина”, Казань (чествование М. М. Зарипова)
 - Логачёв Сергей Юрьевич, начальник отдела медицинской промышленности Министерства промышленности и торговли РФ, Москва (участие в совещании КФТИ КазНЦ РАН)
 - Маймистов Андрей Иванович, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования “Национальный исследовательский ядерный университет (Московский инженерно-физический институт)”, Москва (участие в международном симпозиуме)
 - Макаров Владимир Анатольевич, профессор, Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования “Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова”, Москва (планирование совместных мероприятий)
 - Макаров Александр Аркадьевич, д.ф.-м.н., Учреждение Российской академии наук Институт спектроскопии РАН, Троицк (участие в международном симпозиуме)
 - Малкин Борис Залманович, профессор, Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования “Казанский государственный университет им. В. И. Ульянова-Ленина”, Казань (участие в международной конференции и чествовании М. М. Зарипова)
 - Манцызов Борис Иванович, профессор, Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования “Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова”, Москва (участие в международном симпозиуме)
 - Масалов Анатолий Викторович, профессор, Учреждение Российской академии наук Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва (участие в международном симпозиуме)
 - Машковцев Рудольф Иванович, к.ф.-м.н., Учреждение Российской академии наук Институт минералогии и петрографии Сибирского отделения РАН, Новосибирск (выступление на Учёном совете)
 - Миронов Виктор Леонидович, к.ф.-м.н., Учреждение Российской академии наук Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород (представление докторской диссертации)
 - Миронов Владимир Фёдорович, член-корр. РАН, член Президиума КазНЦ РАН, Учреждение Российской академии наук Институт органической и физической химии им. А. Е. Арбузова Казанского научного центра РАН, Казань (участие в выездном заседании Президиума КазНЦ РАН)
 - Молотков Сергей Николаевич, профессор, Учреждение Российской академии наук Институт физики твёрдого тела РАН, Черноголовка (участие в международном симпозиуме)
 - Муртазаев Акай Курбанович, член-корр. РАН, Учреждение Российской академии наук Институт физики им. Х. И. Амирханова Дагестанского научного центра РАН, Махачкала (участие в выездной сессии Научного совета РАН по физике конденсированных сред)

- Наумов Андрей Витальевич, д.ф.-м.н., Учреждение Российской академии наук Институт спектроскопии РАН, Троицк (участие в международном симпозиуме и оппонирование кандидатской диссертации)
- Никитин Сергей Иванович, к.ф.-м.н., Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования “Казанский государственный университет им. В. И. Ульянова-Ленина”, Казань (оппонирование кандидатской диссертации)
- Никольский Евгений Евгеньевич, член-корр. РАН, зам. председателя по научной работе Учреждения Российской академии наук Казанского научного центра РАН, Казань (участие в выездном заседании Президиума КазНЦ РАН)
- Орлинский Сергей Борисович, к.ф.-м.н., Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования “Казанский государственный университет им. В. И. Ульянова-Ленина”, Казань (оппонирование кандидатской диссертации и участие в международном симпозиуме)
- Осадько Игорь Сергеевич, профессор, Учреждение Российской академии наук Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва (участие в международном симпозиуме)
- Панченко Владислав Яковлевич, академик, председатель Российского фонда фундаментальных исследований, директор Учреждения Российской академии наук Института проблем лазерных и информационных технологий РАН, Москва (участие в международном симпозиуме)
- Пархоменко Александр Юрьевич, ст. науч. сотр., Учреждение Российской академии наук Институт ядерных исследований РАН, Дубна (участие в международном симпозиуме)
- Пенин Александр Николаевич, профессор, Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования “Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова”, Москва (оппонирование кандидатской диссертации)
- Польский Юрий Ехилевич, профессор, Национальный исследовательский университет “Казанский государственный технический университет им. А. Н. Туполева”, Казань (чествование М. М. Зарипова)
- Попов Иван Иванович, профессор, Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования “Марийский государственный университет”, Йошкар-Ола (участие в международном симпозиуме)
- Попова Екатерина Ивановна, зам. начальника отдела физики и астрономии, Российский фонд фундаментальных исследований, Москва (участие в международном симпозиуме)
- Рахматуллин Рафаэль Мансурович, к.ф.-м.н., Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования “Казанский государственный университет им. В. И. Ульянова-Ленина”, Казань (участие в международном симпозиуме)
- Решетов Владимир Александрович, профессор, Тольяттинский государственный университет, Тольятти (участие в международном симпозиуме)
- Рубцова Наталия Николаевна, профессор, Учреждение Российской академии наук Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова Сибирского отделения РАН, Новосибирск (участие в международном симпозиуме)
- Рюмцев Евгений Иванович, профессор, Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования “Санкт-Петербургский государственный университет”, Санкт-Петербург (оппонирование докторской диссертации)
- Рязанов Валерий Владимирович, профессор, Учреждение Российской академии наук Институт физики твёрдого тела РАН, Черноголовка (оппонирование кандидатской диссертации)
- Садыков Эдгар Камилович, профессор, Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования “Казанский государственный университет им. В. И. Ульянова-Ленина”, Казань (участие в международном симпозиуме)
- Сазонов Сергей Владимирович, профессор, Российский научный центр “Курчатовский институт” Институт сверхпроводимости и физики твёрдого тела, Москва (участие в международном симпозиуме)
- Салахов Мякзюм Халимуллович, профессор, академик Академии наук Республики Татарстан, ректор Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования “Казанский государственный университет им. В. И. Ульянова-Ленина”, Казань (участие в международном симпозиуме)
- Сафина Наиля Ибрагимовна, помощник руководителя, Учреждение Российской академии наук Казанский научный центр РАН, Казань (участие в выездном заседании Президиума КазНЦ РАН)
- Сахибуллин Наиль Абдуллович, профессор, академик-секретарь Академии наук Республики Татарстан, Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования “Казанский государственный университет им. В. И. Ульянова-Ленина”, Казань (чествование М. М. Зарипова)
- Сахненко Владимир Павлович, профессор, директор Научно-исследовательского института физики при Ростовском государственном университете “Южный федеральный университет”, Ростов-на-Дону (участие в выездной сессии Научного совета РАН по физике конденсированных сред)
- Силкин Николай Иванович, к.ф.-м.н., Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования “Казанский государственный университет им. В. И. Ульянова-Ленина”, Казань (оппонирование кандидатской диссертации)

- Сенияшин Олег Герольдович, академик, председатель Учреждения Российской академии наук Казанского научного центра РАН, Казань (участие в выездном заседании Президиума КазНЦ РАН)
- Стинский Герман Владимирович, к.т.н., член Президиума КазНЦ РАН, главный учёный секретарь Президиума КазНЦ РАН, Казань (участие в выездном заседании Президиума КазНЦ РАН и чествовании М. М. Зарипова)
- Страумал Борис Борисович, профессор, учёный секретарь Научного совета РАН по физике конденсированных сред, Учреждение Российской академии наук Институт физики твёрдого тела РАН, Черноголовка (участие в выездной сессии Научного совета РАН по физике конденсированных сред)
- Сухоруков Анатолий Петрович, профессор, Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования “Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова”, Москва (участие в международном симпозиуме)
- Тагиров Мурат Салихович, профессор, Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования “Казанский государственный университет им. В. И. Ульянова-Ленина”, Казань (участие в международных конференциях)
- Усачёв Александр Евгеньевич, профессор, Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования “Казанский государственный энергетический университет”, Казань (оппонирование кандидатской диссертации)
- Устинов Николай Витальевич, д.ф.-м.н., Калининградский филиал Российского государственного открытого технического университета путей сообщения, Калининград (участие в международном симпозиуме)
- Фельдман Эдуард Бенъяминович, д.ф.-м.н., Учреждение Российской академии наук Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка (участие в международной конференции)
- Фишман Александр Израйлович, профессор, Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования “Казанский государственный университет им. В. И. Ульянова-Ленина”, Казань (участие в международном симпозиуме и оппонирование кандидатской диссертации)
- Халянин Вячеслав Анатольевич, доцент, Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования “Калининградский государственный технический университет”, Калининград (участие в международном симпозиуме)
- Хамидуллин Фильза Гарифович, профессор, советник Президиума Академии наук Республики Татарстан, Казань (чествование М. М. Зарипова)
- Хворостов Евгений Борисович, ст. науч. сотр., Учреждение Российской академии наук Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова Сибирского отделения РАН, Новосибирск (участие в международном симпозиуме)
- Чекалин Сергей Васильевич, профессор, Учреждение Российской академии наук Институт спектроскопии РАН, Троицк (участие в международном симпозиуме)
- Чернов Владислав Моисеевич, д.б.н., член Президиума КазНЦ РАН, зам. директора по научной работе Учреждения Российской академии наук Казанского института биохимии и биофизики Казанского научного центра РАН, Казань (участие в выездном заседании Президиума КазНЦ РАН)
- Чугуева Ирина Николаевна, зам. председателя Научного совета РАН по физике конденсированных сред, зав. информационным центром Учреждения Российской академии наук Института физики твёрдого тела РАН, Черноголовка (участие в выездной сессии Научного совета РАН по физике конденсированных сред)
- Чехова Мария Владимировна, профессор, Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования “Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова”, Москва (участие в международном симпозиуме)
- Шамров Николай Иванович, д.ф.-м.н., Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования “Мордовский государственный педагогический институт им. М. Е. Евсевьева”, Саранск (участие в международном симпозиуме)
- Шамсутдинов Эмиль Васильевич, к.т.н., член Президиума КазНЦ РАН, зам. директора по научно-образовательной деятельности Исследовательского центра проблем энергетики Учреждения Российской академии наук Казанского научного центра РАН, Казань (участие в выездном заседании Президиума КазНЦ РАН)
- Шашков Андрей Юрьевич, к.ф.-м.н., Российский научный центр “Курчатовский институт” Институт сверхпроводимости и физики твёрдого тела, Москва (участие в международном симпозиуме)
- Шлянников Валерий Николаевич, д.т.н., член Президиума КазНЦ РАН, директор Исследовательского центра проблем энергетики Учреждения Российской академии наук Казанского научного центра РАН, Казань (участие в выездном заседании Президиума КазНЦ РАН)

ФИЗТЕХПРЕСС
2010

ISBN 978-5-94469-024-1