КАЗАНСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

ИМЕНИ
Е. К. ЗАВОЙСКОГО

2017

ЕЖЕГОДНИК

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО НАУЧНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ
РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
КАЗАНСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР

КАЗАНСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

ИМЕНИ Е. К. ЗАВОЙСКОГО

2017

ЕЖЕГОДНИК

ФИЗТЕХПРЕСС
ИЗДАТЕЛЬСТВО
КФТИ ФИЦ «КазНЦ РАН»

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

К14 Казанский физико-технический институт имени Е. К. Завойского 2017.
Ежегодник. – Казань: КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН, 2018. 241 с.

ISBN 978-5-94469-041-8

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

Редактор-составитель В. К. Воронкова

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

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

В ежегоднике представлены материалы, отражающие деятельность Федерального бюджетного учреждения науки Казанского физико-технического института имени Е. К. Завойского Казанского научного центра Российской академии наук в 2017 году.

Сборник включает также некоторый справочный материал по институту.

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

ISBN 978-5-94469-041-8

© КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН, 2018
© Обложка Аксёнов И.А., 2018

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

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

Подписано в печать 05.06.2018
Формат 60x90/8. Бумага мелованная
Гарнитура Times. Печать офсетная
Тираж 180 экз.

Предисловие редактора

Прошедший 2017 год стал годом подготовки документов для смены формы и содержания функционирования нашего института.

С формой всё было довольно определённо. В результате многочисленных встреч, обсуждений сформировалось решение, что все институты РАН в Казани и наша ведомственная поликлиника объединяются в единый федеральный исследовательский центр, причём институты РАН и поликлиника становятся обособленными подразделениями ФИЦ “Казанский научный центр РАН” и сохраняют свои названия. Насколько я понимаю, предполагается определённая степень самостоятельности институтов (некоторая автономия). Степень автономии регулируется уставом ФИЦ и полномочиями, которые делегирует директор ФИЦа руководителям институтов.

Менее определённым представляется содержание научной работы в рамках ФИЦ. Предполагается, что приоритет должен отдаваться междисциплинарным (межинститутским) проектам фундаментальных исследований, всячески поощряется кооперация с производством, взаимодействие с университетами. Сами по себе эти лозунги ничего нового для нас не содержат: мы всегда придерживались этих принципов. Но отсюда не следует, что в отношении содержания работы у нас будет мало изменений. Прежде кооперация, сотрудничество развивались у нас из логики наших фундаментальных исследований и разработок. Мы искали партнёров для сотрудничества в решении проблем. Сейчас кооперация и сотрудничество, похоже, выступает как самоцель: давайте больше кооперироваться, и всё станет лучше. Этот оптимизм подкрепляется ссылкой на синергетический эффект при объединении сложившихся за многие годы профильных институтов КазНЦ РАН в многопрофильный ФИЦ. Однако такое объединение имеет два аспекта: один деструктивный, а другой конструктивный. Деструктивный аспект связан с тем, что при объединении институтов в одну организацию энтропия всей системы возрастает на величину так называемой энтропии смешения. Грубо говоря, просто объединение институтов в один ФИЦ обязательно увеличивает беспорядок, причём это происходит обязательно, от нас это не зависит. Однако объединение институтов потенциально содержит и конструктивный элемент: синергетический эффект. Во всяком случае, при объединении институтов появляются новые степени свободы для объединённой организации, если только включаются взаимодействия между институтами, которые объединяются в один исследовательский центр. Появление таких взаимодействий и в конечном итоге возможный синергетический эффект могут произойти, только как результат нашей работы, нашего желания и готовности взаимодействовать с другими институтами центра. Таким образом, синергетический эффект не случится сам собой, он может реализоваться, только как результат наших целенаправленных и настойчивых усилий.

Мы понимаем эти проблемы объединения институтов в один центр. Поскольку решение об объединении уже принято, нам придётся сильно постараться, чтобы результаты согласованной коллективной работы всех институтов с лихвой компенсировали негатив, связанный с энтропией смешения.

Вся эта “перестройка” в КазНЦ РАН, конечно, отвлекает нас от научных исследований, мешает творческой работе. Для каждого сотрудника и института в целом это создаёт “турбулентную” обстановку. Но, как я уже отмечал в предисловии к прошлогоднему Ежегоднику физтеха, в нашем институте есть традиции, которые позволяют институту работать практически в обычном ритме, несмотря на внешние возмущения. В институте

регулярно работал Учёный совет и регулярно проводились научные сессии Учёного совета, на которых весьма обстоятельно обсуждались научные результаты. Хорошо прошла ежегодная международная конференция “Modern Development of Magnetic Resonance”. Эта конференция позволяет нам не только обменяться опытом, узнать из первых рук о последних достижениях мировой науки в области магнитного резонанса, но и помогает позиционировать Казанский физико-технический институт имени Е. К. Завойского РАН как центр мировой науки в области спектроскопии электронного парамагнитного резонанса. Этой же цели служит ежегодное вручение международной премии имени Е. К. Завойского.

Важнейшей традицией является также издание Ежегодника КФТИ: создание Летописи КФТИ им. Е. К. Завойского продолжается.

И как всегда, Ежегодник готовится нашими коллегами В. К. Воронковой, С. М. Ахминым, О. Б. Яндугановой, Л. В. Мосиной.

Большое им спасибо.

К. М. Салихов

Слово директора

Дорогие коллеги!

В конце 2017 года состоялось давно всеми ожидаемое и широко обсуждавшееся объединение академических институтов города Казани в единый Федеральный исследовательский центр “Казанский научный центр Российской академии наук”. Пожалуй, это одно из самых значительных и неоднозначных событий в жизни института за все годы его существования. Следует признать, что для Физтеха это был вынужденный шаг, продиктованный общей политикой ФАНО России в отношении региональной науки. Наиболее существенным является вопрос о том, чем именно мы сможем компенсировать неизбежную в данной ситуации потерю самостоятельности в решении целого ряда вопросов. На данном этапе принципиально важно для нашего коллектива занять достойное место в качестве структурного подразделения КазНЦ и стать лидером, в первую очередь, в отношении определения научной политики центра. Что же касается вопросов построения новой структуры и вопросов взаимодействия внутри неё, то здесь как нельзя более кстати вспомнить слова С. П. Королёва: “Имейте в виду, если вы сделаете быстро и плохо, то люди забудут, что вы сделали быстро, и запомнят, что вы сделали плохо. Если вы сделаете медленно и хорошо, то люди забудут, что вы сделали медленно, и запомнят, что вы сделали хорошо!”

В сложившейся ситуации поиск внебюджетных источников финансирования становится архиактуальной задачей. И в этом отношении в прошедшем году у нас есть заметные успехи. Имеется в виду победа в конкурсе мегагрантов проекта Физтеха “Квантовые сенсоры на алмазах” под руководством ведущего учёного – американского профессора Филипа Хеммера. Проект посвящён разработке квантовых датчиков на основе центров окраски в алмазе и будет выполняться в сотрудничестве с Институтом прикладной физики РАН. На мой взгляд, это хороший пример того, что может дать объединение компетенций нескольких лабораторий (и нескольких институтов) для решения крупной научной задачи. В рамках данного проекта будет задействована треть научных подразделений института и будет создано новое – лаборатория “Квантовая оптика в алмазах”. Думаю, что потенциал подобных объединений далеко не исчерпан, и мы сможем не раз воспользоваться многообразием наших возможностей и в будущем.

А. А. Калачёв

Содержание

Структура института

11

Важнейшие события года

14 Образование Федерального исследовательского центра “Казанский научный центр Российской академии наук”

Важнейшие результаты года

15 Орден “За заслуги перед Отечеством” III степени
В. К. Воронкова

18 Важнейшие результаты фундаментальных исследований, рекомендованные Учёным советом КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН в отчётный доклад РАН за 2017 год

21 Итоги конкурса научных работ сотрудников КФТИ 2017 года

Научные сообщения

22 Высокочувствительный рабочий элемент для многоразовых люминесцентных термометров на основе застеклованной плёнки бета-дикетонатного комплекса европия(III)
Д. В. Лапаев, В. Г. Никифоров, В. С. Лобков, Ю. Г. Галяметдинов

29 Модификация протокола Карра-Парселла-Мейбума-Гилла для измерения времён фазовой релаксации
Р. Б. Зарипов, И. Т. Хайруждинов, , Е. Л. Вавилова, В. К. Воронкова, К. М. Салихов, В. Е. Катаев

32 Самоорганизация трипептида глицил-глицил-глицин в плёнках до и после взаимодействия с парами органических веществ
А. С. Морозова, С. А. Зиганшина, А. А. Бухараев

35 Влияние спин-решёточной релаксации на частоту модуляции спада сигнала электронного спинового эха ион-радикальной пары $P^{+}_{700}A^{-}_{1}$ фотосистемы 1 в трегалозной матрице при изменении температуры
А. А. Суханов, К. М. Салихов

40 Фотофизические свойства мономерных и димерных медных комплексов копропорфиринов
Ю. Е. Кандрашкин, А. А. Суханов, В. К. Воронкова

44 Продукция оксида азота в тканях сердца и печени лабораторных крыс в ходе восстановления после 30-суточной гипокинезии: ЭПР исследование
В. С. Июдин, В. В. Андрианов, Г. Г. Яфарова, Х. Л. Гайнутдинов

47 Димерная самоорганизация примесных ионов иттербия в монокристаллах синтетического форстерита
В. Ф. Тарасов, А. А. Суханов

51 ЭПР и оптическая спектроскопия ионов Yb^{3+} в кристаллах гексагонального перовскита $RbMgF_3$
М. Л. Фалин, В. А. Латыпов, Г. М. Сафиуллин

56 Парамагнитные дефекты в кристаллах ZnSe, активированных ионами железа
Г. С. Шакуров

60 Изучение магнитных свойств стёкол 25%Al_2O_3-25%K_2O-50%B_2O_3 легированных 4%Fe_2O_3
Р. М. Ерёмина, А. В. Шестаков, И. И. Фазлижанов, И. В. Яцык

63 Влияние анионов на спин-кроссовер свойства, упаковку молекул и магнитное поведение дендримерных комплексов Fe(III) второй генерации
Н. Е. Домрачева, В. Е. Воробьёва

71 ЭПР поиск квантового поведения γ-Fe_2O_3 наночастиц, инкапсулированных в дендримерную матрицу
Н. Е. Домрачева, В. Е. Воробьёва

75 Магнитные взаимодействия в структуре $[Fe(salen)(2\text{-}Me\text{-}Him)]_n$
Т. А. Иванова, О. А. Туранова, Л. В. Мингалиева, И. В. Овчинников

80 ^{31}P ЯМР спектроскопия крови крыс при травме спинного мозга
С. В. Юртаева, М. Ю. Волков, Г. Г. Яфарова

85 Интегральный однофотонный источник на основе оптических нановолокон
А. А. Шухин, А. А. Калачёв

88 Наблюдение методом спектральной эллипсометрии аморфного кремния, облучённого низкими дозами ионов серебра
В. В. Базаров, В. И. Нуждин, В. Ф. Валеев, А. Л. Степанов

92 Микроскопия поверхности кремния, имплантированного ионами серебра
В. В. Воробьев, А. М. Рогов, Ю. Н. Осин, В. И. Нуждин, В. Ф. Валеев, А. Л. Степанов

96 Создание установки для измерения вольтамперных характеристик полупроводниковых элементов
Д. А. Коновалов, В. И. Нуждин, В. Ф. Валеев, А. Л. Степанов

98 Опытный образец скважинного прибора для измерения диэлектрических характеристик пластового флюида
Д. А. Коновалов, Я. В. Фаттахов, А. Р. Фахрутдинов, В. А. Шагалов, Р. Ш. Хабипов, А. Н. Аникин

101 Стационарное устройство для подачи жидкого азота в систему охлаждения вакуумной камеры ионного ускорителя ИЛУ-3
В. И. Нуждин, В. Ф. Валеев, Д. А. Коновалов

105 Разработка и изготовление автоматизированного комплекса для определения фотоэлектрических характеристик солнечных элементов
В. И. Нуждин, Д. А. Коновалов, В. Ф. Валеев, А. Л. Степанов

108 Формирование пористого германия с наночастицами серебра методом ионной имплантации
А. М. Рогов, В. И. Нуждин, В. Ф. Валеев, В. В. Воробьев, Ю. Н. Осин, А. Л. Степанов

113 Имплантация алмаза ионами серебра и создание дифракционного элемента
А. Л. Степанов, В. И. Нуждин, В. Ф. Валеев, М. Ф. Галяутдинов, Н. В. Курбатова, В. В. Воробьев, А. М. Рогов, Ю. Н. Осин
117 Дилатометрия полиметилметакрилата при низких температурах
Б. Ф. Фаррахов, Я. В. Фаттахов, М. Ф. Галяутдинов, А. Л. Степанов
120 Воздействие импульсных лазерных и ионных пучков на вакуумно-осаждённые слои Ge:Sb на подложках Ge. Расчёты и эксперимент
Г. А. Новиков, Р. М. Баязитов, Р. И. Баталов, И. А. Файзрахманов, Н. М. Лядов, В. А. Шустов
127 Влияние импульсного лазерного отжига на структурные, оптические и фотоэлектрические свойства композитных слоёв Si и GeSi с наночастицами Ag, полученных ионной имплантацией
Р. И. Баталов, В. И. Нуждин, В. Ф. Валеев, Д. А. Бизяев, Н. И. Нургазизов, А. А. Бухараев, В. А. Шустов, В. В. Воробьев, Ю. Н. Осин, А. Л. Степанов
133 Исследования методом ФМР магнитной анизотропии плёнок, полученных при имплантации ионов Co^+ в Si
В. В. Чирков, Г. Г. Гумаров, В. Ю. Петухов, М. М. Бакиров, В. Ф. Валеев

Аспиранты и молодые учёные

138

Персоналии

139 Вадим Алексеевич Голенищев-Кутузов. К 85-летию со дня рождения
В. А. Голенищев-Кутузов
150 Валентин Серапионович Романов. К 80-летию со дня рождения
В. В. Самарцев, А. М. Шегеда, В. Н. Лисин, Р. Н. Шахмуратов, А. А. Калачёв, Т. Г. Митрофанова, А. В. Шкаликов, И. З. Латыпов
151 Алевтина Павловна Блатт. К 80-летию со дня рождения
Р. М. Ерёмина
152 Юрий Васильевич Владимирцев. К 80-летию со дня рождения
Н. К. Соловаров, Г. С. Шакуров, В. Ф. Тарасов
153 Лариса Васильевна Воронова. К 70-летию со дня рождения
Н. А. Карташёва, Х. Л. Мухтасарова
154 Валентин Александрович Жихарев. К 70-летию со дня рождения
Ю. И. Таланов, Г. Б. Тейтельбаум
155 Виолета Константиновна Воронкова. К 70-летию со дня рождения
Л. В. Мосина, К. М. Салихов
158 Халил Латыпович Гайнутдинов. К 70-летию со дня рождения
В. В. Андрианов, Т. Х. Богодвид, Г. Г. Яфарова, Л. Н. Муранова, И. Б. Дерябина
159 Валерий Фёдорович Тарасов. К 70-летию со дня рождения
Х. Г. Богданова, С. А. Мигачёв, К. М. Салихов
162 Станислав Александрович Мигачёв. К 70-летию со дня рождения
Х. Г. Богданова, А. М. Шегеда, В. Н. Лисин, В. Ф. Тарасов
163 Булат Шавкатович Хамидуллин. К 70-летию со дня рождения
Д. А. Коновалов
164 Халима Лутфулловна Мухтасарова. К 70-летию со дня рождения
В. Ю. Петухов
165 Лидия Григорьевна Матюнина. К 70-летию со дня рождения

Памяти...

166 Памяти Олега Файзаниевича Гатауллина. К 80-летию со дня рождения
Ю. М. Рыжманов, Р. М. Ерёмина
167 Пямяти Ильдуса Бариевича Хайбуллина. К 80-летию со дня рождения
Р. М. Баязитов, И. А. Файзрахманов
168 Памяти Ралифа Шаймулловича Сафина. К 70-летию со дня рождения
Е. Н. Фролова
170 Памяти Альбины Кузьминичны Московской. К 70-летию со дня рождения
Х. Л. Мухтасарова
171 Памяти Евгения Петровича Жеглова
В. Ю. Петухов

Научно-организационная деятельность

172 Ионная имплантация. От открытия физического явления до передовых технологий
Р. М. Баязитов
174 О работе Учёного совета КФТИ КазНЦ РАН
В. К. Воронкова
175 Международная конференция по лазерной физике (LPHYS 2017)
А. А. Калачёв
177 XXI Всероссийская конференция по физике сегнетоэлектриков (ВКС-XXI) и Международный семинар “Фазовые переходы и неоднородные состояния в оксидах”
Р. Ф. Мамин
179 11 Международный симпозиум по фотонному эхо и когерентной спектроскопии (ФЭКС-2017)
В. В. Самарцев, А. А. Калачёв, А. В. Наумов, С. В. Сазонов, К. Р. Каримуллин
186 Международная конференция “Modern Development of Magnetic Resonance”
К. М. Салихов, В. К. Воронкова
190 Двадцать первая Международная молодёжная научная школа “Когерентная оптика и оптическая спектроскопия”
М. Х. Салахов, В. В. Самарцев, Д. И. Камалова
192 И вечный бой! Покой нам только снится
В. В. Самарцев
194 Премия им. М. Л. Блатта 2017
В. Н. Лисин
195 Международная премия им. Е. К. Завойского 2017
Л. В. Мосина
196 Журнал “Applied Magnetic Resonance”
Л. В. Мосина
197 “EPR newsletter”: 15 + и новые рубежи Казанской редакции издания
Л. В. Мосина
199 Репортаж с торжественного заседания, посвящённого проводам Старого и встрече Нового 2018 года
Л. Г. Гафиятуллин, Т. П. Гаврилова, И. В. Яцык

СМИ о сотрудниках института

203 В КФУ молодым учёным вручили премию Завойского
204 В Казани профессору из Японии вручили международную премию имени Е. К. Завойского
205 Новичок с хорошим потенциалом

Цифры и факты

207 2017 год в цифрах
208 Темы государственного задания на 2017 год
208 Проекты, финансируемые на конкурсной основе
211 Публикации сотрудников института
220 Патенты
220 Защиты, награды
221 Участие сотрудников института в преподавательской деятельности
221 Конференции, организованные КФТИ и при участии КФТИ
231 Участие сотрудников в конференциях
239 Гости института

СТРУКТУРА ИНСТИТУТА

Структура приводится по состоянию на 11 июля 2017 года.

Дирекция

Директор
Калачёв Алексей Алексеевич, д.ф.-м.н.,
профессор РАН
(врио директора института с 10.06.2015 г.)

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

Зам. директора по общим вопросам
Аджалиев Юнус Амзанович (до 11.09.2017 г.)
Оладошкин Юрий Владимирович (с 14.09.2017 г.)

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

Научный руководитель института

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

Учёный совет

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

Научные подразделения

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

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

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

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

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

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

Отдел когерентной и нелинейной оптики
Заведующий: д.ф.-м.н., профессор РАН Калачёв Алексей Алексеевич

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Лаборатория проблем сверхпроводимости и спинтроники
Заведующий: заслуженный деятель науки РТ, проф., д.ф.-м.н. Тейтельбаум Григорий Бенционович

Лаборатория физики ферроиков и функциональных материалов
Заведующий: д.ф.-м.н. Мамин Ринат Файзрахманович

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

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

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

Научно-вспомогательные подразделения

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

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

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

Научно-техническая библиотека
Заведующая: Фалина Гульшат Эльгизовна

Научно-организационный отдел
Руководитель: учёный секретарь
Воронкова Виолета Константиновна

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

Производственные подразделения

Экспериментальная мастерская
Руководитель: Смекалов Леонид Георгиевич

Группа по эксплуатации зданий
Руководитель: Хлебников Игорь Святославович

Группа текущего ремонта зданий и сооружений
Руководитель: Смекалов Леонид Георгиевич

Прочие подразделения

Гараж
Механик: Лукин Иван Тимофеевич

Административно-хозяйственная часть
Зав. хозяйством: Куприянова Ольга Олеговна

Административно-управленческие подразделения

Приёмная
Секретарь директора:
Губайдуллина Альфия Закировна

Канцелярия
Заведующая: Куркина Нина Георгиевна

Бухгалтерия
Главный бухгалтер: Гусева Раиса Рафаиловна

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

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

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

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

Контрактная служба
Контрактный управляющий:
Авхадиева Нина Васильевна

ВАЖНЕЙШИЕ СОБЫТИЯ ГОДА

Образование Федерального исследовательского центра “Казанский научный центр Российской академии наук”

14 июня 2017 был издан приказ ФАНО России № 335 “О реорганизации Федерального государственного бюджетного учреждения науки Казанского научного центра Российской академии наук” (КазНЦ РАН). В соответствии с этим приказом КазНЦ РАН реорганизован путём присоединения к нему Казанского физико-технического института им. Е. К. Завойского, Института механики и машиностроения, Института органической и физической химии им. А. Е. Арбузова, Казанского института биохимии и биофизики, Татарского научно-исследовательского института сельского хозяйства, Татарского научно-исследовательского института агрохимии и почвоведения, поликлиники Казанского научного центра. 14 ноября 2017 года приказом ФАНО России утверждён устав Федерального государственного бюджетного учреждения науки “Федеральный исследовательский центр “Казанский научный центр Российской академии наук” (ФИЦ КазНЦ РАН). 15 ноября 2017 года на заседании Совета при Президенте Республики Татарстан по науке и образованию руководитель ФАНО России М. М. Котюков заявил о завершении реорганизации Федерального исследовательского центра “Казанский научный центр”, и состоялась официальная презентация ФИЦ КазНЦ РАН. Этому событию предшествовало множество обсуждений и большой объём подготовительной работы. Учёный совет КФТИ ещё в 2016 году проголосовал за участие в интеграционном процессе. В начале 2017 года Учёный совет согласился с участием КФТИ КазНЦ РАН в реализации интеграционного проекта по созданию ФИЦ КазНЦ РАН путём присоединения КФТИ и других институтов КазНЦ РАН к ФИЦ КазНЦ РАН на правах обособленых научных подразделений. Приказом ФИЦ КазНЦ РАН от 22.11.2017 г. № 45 наш институт обрёл новый статус: Казанский физико-технический институт им. Е. К. Завойского – обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки “Федеральный исследовательский центр “Казанский научный центр Российской академии наук”. Институт перестал быть юридическим лицом и теперь, являясь обособленным структурным подразделением, осуществляет свою деятельность от имени ФИЦ КазНЦ РАН в соответствии с полномочиями, делегированными ему ФИЦ КазНЦ РАН.

Заседание Совета при Президенте Республики Татарстан по науке и образованию 15 ноября 2017 г.

ВАЖНЕЙШИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ГОДА

Орден “За заслуги перед Отечеством” III степени

Указом Президента РФ от 5 сентября 2017 г. академик, д.-ф.м.н., проф., научный руководитель КФТИ награждён орденом “За заслуги перед Отечеством” III степени. Высокая и заслуженная награда! Кев Минуллинович Салихов бесконечно предан науке, это он доказал всей своей научной биографией.

Кев Минуллинович во всех вопросах должен дойти до самой сути, этому он учит окружающих. Эта черта в сочетании с необыкновенным умом и трудоспособностью позволила ему получить много новых результатов в нескольких научных направлениях.

Полученные им теоретические результаты оказали существенное влияние на формирование и развитие новой области науки – спиновой химии. Он дал интерпретацию первых экспериментальных наблюдений влияния внешнего магнитного поля на радикальные реакции и магнитного изотопного эффекта в радикальных реакциях. Им были сформулированы впервые квантовые кинетические уравнения для одночастичных спиновых матриц плотности свободных радикалов с учетом спин-зависимой рекомбинации радикалов при их столкновениях. При этом было получено также уравнение для оператора эффективности рекомбинации при столкновении с учётом зависящих от расстояния между радикалами взаимодействий при произвольной кинематике прохождения радикалами области взаимодействия при столкновениях. С помощью этих уравнений впервые рассчитана константа скорости рекомбинации радикалов с учётом спиновых эффектов. Для понимания физики химически индуцировнной гиперполяризации электронных и ядерных спинов большую роль играет предложенное Салиховым К.М. описание с использованием физических величин, которые характеризуют упорядоченности спинов по отношению к внешнему магнитному полю и друг к другу. Кев Минуллинович теоретически предсказал экстремальный характер полевой зависимости вероятности рекомбинации радикальных пар, электрон-дырочных пар в области слабых магнитных полей, сравнимых с локальными полями, создаваемыми сверхтонкими взаимодействиями с магнитными ядрами. Предсказал особенности в вероятности рекомбинации радикальных пар в точках пересечения их диабатических термов. Это привело к созданию MARY-спектроскопии. Установил основные закономерности химической поляризации ядерных спинов в слабых магнитных полях, теоретически предсказал эффект взаимного влияния ядер на их поляризацию. Предсказал механизм и установил основные проявления стимулированной поляризации ядерных спинов. На основе этого был разработан уникальный высокочувствительный метод регистрации спектров ЭПР с помощью наблюдения поляризации ядерных спинов в спектрах ЯМР. Дал теоретическую оценку максимально возможного вклада сверхтонкого взаимодействия в вероятность рекомбинации радикальных пар. Рассчитал вероятность рекомбинации радикальных пар с произвольным числом магнитных ядер в земном магнитном поле. Внёс заметный вклад в теорию оптически детектируемых спектров ЭПР спин-коррелированных радикальных пар. Салихов К.М. предсказал новый механизм поляризации электронных спинов триплетных экситонов, вызванной их взаимной аннигиляцией. Спиновая поляризация,

Президент РТ Р. Н. Минниханов поздравил академика К. М. Салихова с высокой правительственной наградой.

обусловленная этим механизмом, экспериментально доказана с помощью времяразрешённой ЭПР спектроскопии триплетных экситонов в молекулярных кристаллах.

Салихов К.М. заложил основы теории импульсных методов ЭПР. Теоретически показал возможность наблюдения модуляции сигнала электронного спинового эха в аморфных и поликристаллических веществах. Впервые изучил роль селективности возбуждения спиновой системы СВЧ импульсами, формирующими сигналы электронного спинового эха. Разработал теорию фазовой релаксации электронных спинов в твёрдых парамагнетиках за счёт спин-спинового диполь-дипольного взаимодействия между парамагнитными центрами: установил предельные законы спада сигналов эха по механизму спектральной диффузии, развил теорию спада сигналов эха по механизму так называемой “мгновенной диффузии”. Им изучен вклад анизотропии *g*-тензора парамагнитных центров и поляризации их спинов в фазовую релаксацию за счёт спин-спинового диполь-дипольного взаимодействия Им развита теория переноса спинового возбуждения по спектру ЭПР при медленном вращении парамагнитных частиц с учётом изменения оси квантования ядерных спинов при вращении частиц с анизотропным сверхтонким взаимодействием. Теоретически и экспериментально показано, что спектральная диффузия может приводить к появлению узких провалов в спектре ЭПР ванфлековского парамагнетика вблизи нулевого значения магнитного поля. Эффект обнаружен и экспериментально исследован для примесных ионов Cr^{2+} в синтетическом форстерите (Mg_2SiO_4). Он соавтор получившего широкое применение метода измерения расстояния между парамагнитными частицами в диапазоне 1–10 нм с помощью импульсных экспериментов ЭПР с двумя частотами (метод ДЭЭР). Этот метод сегодня очень широко используется в молекулярной биологии.

К. М. Салихов внёс основополагающий вклад в теорию гейзенберговского спинового обмена в парамагнетиках. Он предложил кинетические уравнения для одночастичных спиновых матриц плотности парамагнитных частиц в разбавленных растворах для описания спинового обмена при столкновении парамагнитных частиц в конденсированных средах и с их помощью рассчитал сечения спинового обмена с участием свободных радикалов, парамагнитных комплексов, триплетных экситонов и сечение обменной конверсии позитрония парамагнитными частицами. Предсказал новый механизм сдвига линий ЭПР за счёт обменного взаимодействия. Им рассчитаны константы скорости спинового обмена между парамагнитными частицами с произвольными спинами при диффузионном прохождении сталкивающимися частицами области взаимодействия. Установлены новые проявления обменных взаимодействий в спектрах ЭПР систем, построенных из ионов с существенно разными скоростями парамагнитной релаксации, и на их основе реализована новая методика определения энергии обменного и диполь-дипольного взаимодействий ионов группы железа с редкоземельными ионами.

Салихов К.М. внёс весомый вклад в изучение методами ЭПР первичных стадий ассимиляции солнечной энергии фотосинтетическими системами. Развил теорию времяразрешённых спектров ЭПР и теорию электронного спинового эха электрон-дырочных пар, которые образуются в реакционном центре фотосинтеза в синглетном состоянии. Для этой ситуации им предсказаны квантовые биения интенсивности линий ЭПР, аномальная фаза сигнала первичного спинового эха и двухквантовые ЭПР переходы даже в ситуации, когда спин-спиновое взаимодействие в паре в момент наблюдения пары пренебрежимо мало. Наблюдаемые двухквантовые переходы обязаны взаимодействию между спинами до образования спин-коррелированной пары. Для фотосистемы 1 впервые дано описание наблюдаемых спектров ЭПР в X, Q, W диапазонах частот единым набором параметров, задающих взаимное расположение донора (димер хлорофилла) и акцептора электрона (хинон) и времена жизни электрона на первичном и вторичном акцепторах. Разработана теория поляризации электронных спинов в последовательности двух ион-радикальных пар, которые образуются на первичных стадиях фотосинтеза в результате переноса электрона от первичного акцептора к вторичному в реакционном центре природных и модифицированных фотосинтетических систем. Показано, что форма спектра ЭПР вторичной пары позволяет определить время жизни электрона на первичном акцепторе и величину обменного взаимодействия в первичной паре, недоступной для непосредственного наблюдения с помощью ЭПР из-за короткого времени жизни электрона на первичном акцепторе. Полученные результаты применяются для изучения разделения заряда на ранних стадиях фотосинтеза, в частности, для решения вопроса о канале переноса электрона на ранней стадии разделения зарядов в реакционном центре

Под его руководством впервые создан алгоритм ЭПР томографии в средах с проводимостью и диэлектрическими потерями. Впервые с помощью ЭПР томографии визуализирован скин-слой.

Основные научные результаты, полученные К. М. Салиховым за последние 10 лет

В области создания квантовых компьютеров и квантовой информатики

– Предложен оригинальный протокол квантовой телепортации состояния электронного спина. Разработана детальная теория реализации этого протокола для квантовой телепортации через мембрану в реакционном центре фотосинтетических систем. Важнейшей составной частью этого протокола является использование в качестве логических операций спиновых правил отбора в элементарных фотоиндуцированных химических реакциях (K. Salikhov, J. H. Golbeck,

D. Stehlik: Quantum teleportation across a biological membrane by means of correlated spin pair dynamics in photosynthetic reaction centers. Appl. Magn. Reson. **31**, 237–252 (2007); Yu. E. Kandrashkin, K. M. Salikhov: Numerical simulation of quantum teleportation across biological membrane in photosynthetic reaction centers. Appl. Magn. Reson. **37**, 549–566 (2010)).

– Впервые в мировой науке сформулирован протокол реализации на электронных спинах базовой логической операции CNOT (контролируемый нет) универсального квантового компьютера. Протокол основан на использовании специальных последовательностей резонансных СВЧ импульсов для управления движением спинов неспаренных электронов (M. Yu. Volkov, K. M. Salikhov: Pulse protocols for quantum computing with electron spins as qubits. Appl. Magn. Reson. **41**, 145–154 (2011)).
– Впервые для динамики электронных спинов теоретически показана возможность проявления в импульсных ЭПР экспериментах квантового эффекта Зенона, суть которого состоит в том, что квантовая динамика замедляется, если она подвергается внешнему контролю. Теоретические расчёты хорошо согласуются с данными экспериментов (R. Zaripov, E. Vavilova, V. Miluykov, I. Bezkishko, O. Sinyashin, K. Salikhov, V. Kataev, B. Büchner: Boosting of electron spin coherence in binuclear Mn complexes by multiple microwave pulses. Phys. Rev. B **88**, 0894418 (1–8) (2013)).

В области развития методологии ЭПР

– Развита теория модуляции спада сигналов электронного спинового эха в экспериментах по импульсному двойному электрон-электронному резонансу (ДЭЭР), которая расширила возможности ДЭЭР метода для измерения расстояний между парамагнитными метками для систем, в которых спектры ЭПР спиновых меток перекрываются. Эта теория имеет большое значение для определения расстояний 1.5–8 нм между спиновыми метками в сложных молекулярных структурах (K. M. Salikhov, I. T. Khairuzhdinov, R. B. Zaripov: Three pulse ELDOR theory revisited. Appl. Magn. Reson. **45**, 573–620 (2014); K. M. Salikhov, I. T. Khairuzhdinov: Four-pulse ELDOR theory of the spin 1/2 label pairs extended to overlapping EPR spectra and to overlapping pump and observer excitation bands. Appl. Magn. Reson. **46**, 67–84 (2015)).

В области спинового обмена между парамагнитными частицами в результате их бимолекулярных столкновений

– Впервые развита теория бимолекулярного спинового обмена между заряженными парамагнитными частицами (спиновыми зондами) в электролитах. Сформулированы кинетические уравнения для матрицы плотности с учётом двойных столкновений заряженных спиновых зондов. Теоретические результаты расширяют возможности применения метода спинового зонда для исследования бимолекулярных столкновений в электролитах (K. M. Salikhov, A. E. Mambetov, M. M Bakirov, R. T. Galeev, I. T. Khairuzhdinov, R. B. Zaripov, B. Bales: Spin exchange between charged paramagnetic particles in dilute solutions. Appl. Magn. Reson. **45**, 911–940 (2014)).
– Дана совершенно новая интерпретация явления обменного сужения спектров ЭПР, вызванного случайным процессом переноса когерентности при бимолекулярных столкновениях спиновых зондов в разбавленных растворах. Показано, что благодаря обмену когерентности при столкновениях формируются коллективные моды эволюции спиновой квантовой когерентности. В условиях обменного сужения внешнее СВЧ поле возбуждает практически только одну из коллективных мод, а остальные коллективные моды не возбуждаются СВЧ полем в ЭПР экспериментах, они являются “тёмными” в ЭПР спектроскопии (K. M. Salikhov. Consistent paradigm of the spectra decomposition into independent resonance lines: Appl. Magn. Reson. **47**, 1207–1228 (2016)).
– Предложена последовательная теория формы спектров ЭПР нитроксильных радикалов (парамагнитных меток) в растворах, предложен новый алгоритм разделения вкладов обменного и диполь-дипольного спин-спинового взаимодействия в фазовую релаксацию и перенос спиновой когерентности. (K. M. Salikhov. Contributions of exchange and dipole-dipole interactions to the shape of EPR spectra of free radicals in diluted solutions. Appl. Magn. Reson. **38**, 237–256 (2010); K. M. Salikhov, M. M. Bakirov, R. T. Galeev: Detailed analysis of manifestations of the spin coherence transfer in EPR spectra of ^{14}N nitroxide free radicals in non-viscous liquids. Appl. Magn. Reson. **47**, 1095–1122 (2016); B. L. Bales, M. M. Bakirov, R. T. Galeev, I. A. Kirilyuk, A. I. Kokorin, K. M. Salikhov: The current state of measuring bimolecular spin exchange rates by the EPR spectral manifestations of the exchange and dipole-dipole interactions in dilute solutions of nitroxide free radicals with proton hyperfine structure. Appl. Magn. Reson. **48**, 1375–1397 (2017)).

Кев Минуллинович необыкновенно щедро передаёт свои знания молодёжи. Это касается не только аспирантов и молодых научных сотрудников, которые непосредственно работают с ним, но и любого, кто к нему обратится. Несмотря на большую научную нагрузку, К. М. Салихов с энтузиазмом читает лекции школьникам.

Большая заслуга Кева Минуллиновича в пропаганде российской науки – в укреплении приоритета нашей страны в области электронного парамагнитного резонанса, спиновой науки и спиновой технологии. По инициативе К. М. Салихова учреждена международная премия им. Е. К. Завойского и международный журнал “Applied Magnetic Resonance”, ежегодно проводится

международная конференция “Modern Development of Magnetic Resonance”. В 2011 г. К. М. Салихов организовал в Казани первую международную конференцию “Спиновая физика, спиновая химия, спиновая технология”. Она имела успех и было решено проводить такую конференцию регулярно. Вторая конференция прошла в С.-Петербурге (ФТИ РАН) и третья пройдёт в Новосибирском Академгородке в 2018 г.

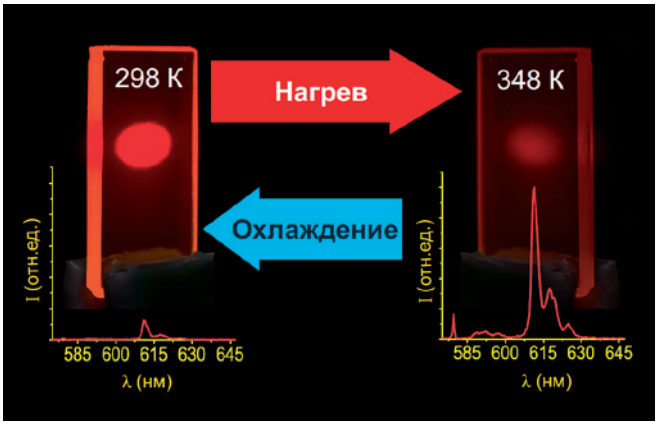
Активная жизненная позиция Кева Минуллиновича позволяет утверждать, что впереди ещё много наград.

В. К. Воронкова

Важнейшие результаты фундаментальных исследований, рекомендованные Учёным советом КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН в отчётный доклад РАН за 2017 год

1.

Высокочувствительный рабочий элемент на основе застеклованной плёнки бета-дикетонатного комплекса Eu(III) для многоразовых люминесцентных термометров



Обратимое изменение интенсивности люминесценции в области температур 298–348 К.

Аннотация. Создан новый термочувствительный материал с интенсивной люминесценцией ионов Eu^{3+}, эффективно возбуждаемой при облучении светом в диапазоне длин волн 280–415 нм. Материал представляет собой застеклованную плёнку толщиной 20 мкм, изготовленную из порошка мезогенного бета-дикетонатного комплекса европия(III) и защищённую двумя кварцевыми пластинами от контакта с атмосферным кислородом. Преимуществами данного материала по сравнению с ближайшими аналогами является полная устойчивость к УФ-излучению, высокое оптическое качество, обратимость температурной зависимости интенсивности и времени затухания люминесценции в области 298–348 К и рекордная температурная чувствительность времени затухания люминесценции – 6.5 мкс · $К^{-1}$. Исследования показали, что созданный материал является многообещающим лабораторным прототипом термочувствительного элемента многоразового действия для люминесцентных термометров длительного мониторинга температуры в диапазоне 298–348 К.

Лаборатория быстропротекающих молекулярных процессов КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН.

Руководитель: Лобков В.С.

Исполнители: Лапаев Д.В., Никифоров В.Г., Галяметдинов Ю.Г.

Соисполнители: Князев А.А. (ФГБОУ ВО “КНИТУ”)

Публикации:

1. Lapaev D.V., Nikiforov V.G., Safiullin G.M., Lobkov V.S., Knyazev A.A., Krupin A.S., Galyametdinov Y.G.: Changes in luminescent properties of vitrified films of terbium(III) β-diketonate complex upon UV laser irradiation. J. Lumin. **175**, 106–112 (2016)
2. Lapaev D.V., Nikiforov V.G., Safiullin G.M., Lobkov V.S., Knyazev A.A., Krupin A.S., Galyametdinov Y.G.: UV laser-induced enhancement of photoluminescence intensity in vitrified terbium(III) β-diketonate complex film in air. J. Lumin. (2017) (in print)
3. Lapaev D.V., Nikiforov V.G., Lobkov V.S., Knyazev A.A., Galyametdinov Y.G.: Reusable temperature-sensitive luminescent material based on vitrified film of europium(III) β-diketonate complex. Opt. Mater. (2017) (in print)
4. Лапаев Д.В., Зиятдинова Р.М., Никифоров В.Г., Лобков В.С.: Фотостабильность застеклованной плёнки β-дикетонатного комплекса тербия(III) в присутствии атмосферного кислорода. Вестн. Казан. технолог. ун-та **20**, № 7, 5–9 (2017)
5. Закарьяева А.Т., Карякин М.Е., Лапаев Д.В., Молостова Е.Ю., Князев А.А., Галяметдинов Ю.Г.: Определение относительного квантового выхода люминесценции растворов мезогенных комплексов европия в толуоле. Вестн. Казан. технолог. ун-та **20**, № 16, 19–22 (2017)
6. Лапаев Д.В., Зиятдинова Р.М., Князев А.А., Галяметдинов Ю.Г., Никифоров В.Г., Лобков В.С.: Светотрансформирующие и термосенсорные свойства застеклованной плёнки β-дикетонатного комплеса европия(III). Вестн. Казан. технолог. ун-та **20**, № 18, 26–28 (2017)

2.

Обнаружено возникновение квази-двумерного электронного газа на границе сегнетоэлектрика $Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO_3$ и антиферромагнетика $LaMnO_3$.

Аннотация. Предсказан и обнаружен квази-двумерный электронный газ на границе раздела сегнетоэлектрик/антиферромагнетик. Проведено моделирование структурных и электронных свойств гетероструктуры сегнетоэлектрик/антиферромагнетик $BaTiO_3/LaMnO_3$. Экспериментально обнаружен переход в состояние с высокой плотностью носителей и металлических характером температурной зависимости сопротивления на интерфейсе при нанесении эпитаксиальной сегнетоэлектрической плёнки $Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO_3$ толщиной 350 нм на монокристалл антиферромагнетика $LaMnO_3$.

Лаборатория физики ферроиков и функциональных материалов КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН; Открытая лаборатория “Новые материалы для квантовых технологий” КФУ.
Руководитель: Мамин Р.Ф.
Публикации:

1. Павлов Д.П., Пиянзина И.И., Мухортов В.М., Балбашов А.М., Таюрский Д.А., Гарифуллин И.А., Мамин Р.Ф.: Двумерный электронный газ на границе сегнетоэлектрика $Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO_3$ и антиферромагнетика $LaMnO_3$. Письма в ЖЭТФ **106**, вып. 7, 440–444 (2017)

3.

Гетероструктура сверхпроводник-ферромагнетик, переключаемая магнитным полем между сверхпроводящим и нормальным состояниями

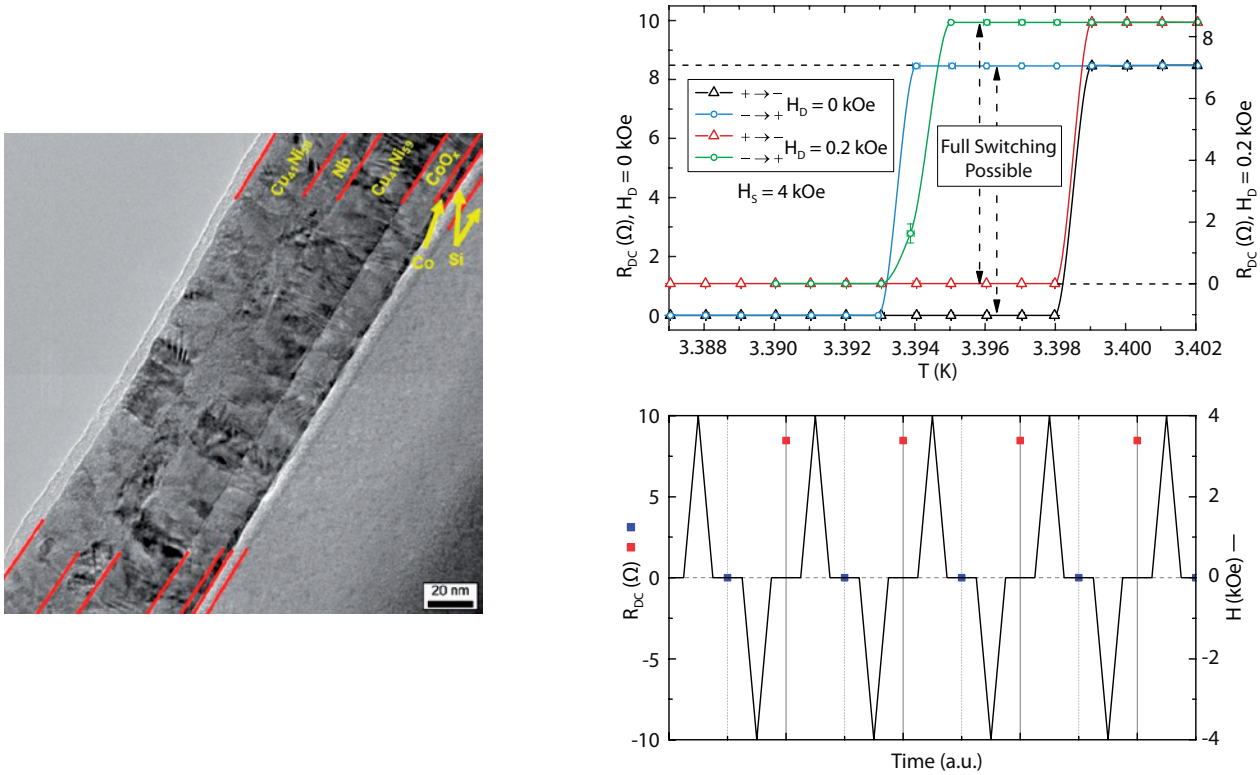


Рис. 1. Сечение гетероструктуры, полученное просвечивающей электронной микроскопией (слева); кривые сверхпроводящего перехода (справа вверху) и переключение гетероструктуры импульсами магнитного поля (справа внизу, чёрные сплошные линии) между сверхпроводящим состоянием (квадраты на уровне нулевого сопротивления) и нормальным состоянием (квадраты на уровне 8 Ом).

Аннотация. Синтезирована и исследована гетероструктура сверхпроводник-ферромагнетик (рис. 1, левое окно), которая переключается из сверхпроводящего состояния в нормальное с помощью импульса относительно небольшого магнитного поля (рис. 1, правое окно). Для поддержания полученного после импульса сверхпроводящего или нормального состояния не требуется поддерживающего магнитного поля. Такая гетероструктура может работать в качестве ячейки сверхпроводящей памяти.

Лаборатория нелинейной оптики КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН.
Исполнитель: Тагиров Л.Р.
Публикации:

Lenk D., Morari R., Zdravkov V.I., Ullrich A., Khaydukov Yu., Obermeier G., Müller C., Sidorenko A.S., Krug von Nidda H.-A., Horn S., Tagirov L.R., Tidecks R.: Full switching FSF-type superconducting spin-triplet MRAM-element. Phys. Rev. B **96**, N. 18, 184521(18) (2017)

4.

Предложен многоимпульсный протокол для эффективного управления спиновой когерентностью в ЭПР-экспериментах.

Аннотация. С помощью импульсного метода ЭПР в X- и Q-диапазонах частот изучались процессы декогерентности спинов иона меди в двух монокристаллах диамагнитно разбавленных комплексов с различным лигандным окружением. Времена дефазировки электронного спина T_m при разных температурах измерялись с помощью первичного эхо и специальной многоимпульсной последовательности Карра-Парсела-Мейбума-Гилла (КПМГ). Применение протокола КПМГ привело к значительному увеличению времени жизни спиновой когерентности в обоих комплексах по сравнению с результатами первичного эха. Протокол показал эффективность подавления канала декогеренции в изученных комплексах, возникающих из-за спектральной диффузии, вызванной случайной модуляцией сверхтонкого взаимодействия ядерными спинами. Кроме того, в нашей работе мы предлагаем усовершенствованный протокол КПМГ. Показано, что данный протокол может эффективно устранять эффекты, связанные с проявлением нежелательных сигналов спинового эха, влияющих на сохранение спиновой когерентности в изучаемой системе, которые неизбежно возникают в случае неоднородно уширенных спектров ЭПР из-за селективного характера возбуждения электронных спинов.

Лаборатория спиновой физики и спиновой химии и лаборатория физики ферроиков и функциональных материалов КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН.

Исполнители: Зарипов Р.Б., Вавилова Е.Л., Хайруждинов И.Т., Воронкова В.К., Салихов К.М., Катаев В.Е.

Публикации:

1. Zaripov R., Vavilova E., Khairuzhdinov I., Salikhov K., Voronkova V., Abdulmalic M.A., Meva F.E., Weheabby S., Rüffer T., Büchner B., Kataev V.: Tuning the spin coherence time of Cu(II)-(bis)oxamato and Cu(II)-(bis) oxamidato complexes by advanced ESR pulse protocols. Beilstein J. Nanotechnol. **8**, 943–955 (2017)

5.

Визуализация химической реакции циклизации дипептида в твёрдом состоянии с помощью атомно-силового микроскопа

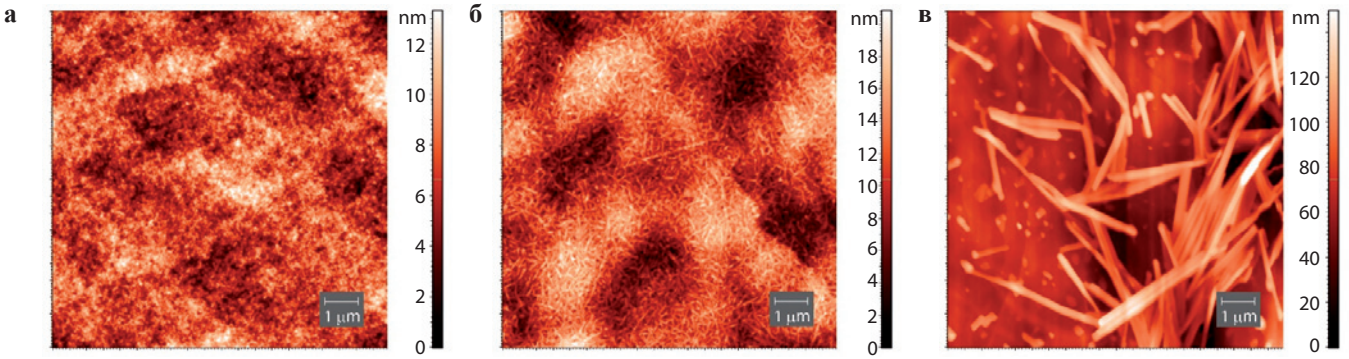


Рис. 1. АСМ изображения поверхности исходной плёнки дипептида лейцил-лейцин, нанесённой на поверхность ВОПГ (**а**), плёнки дипептида лейцил-лейцин после нагревания до 145 °C (**б**), плёнки дипептида лейцил-лейцин после нагревания до 200 °C (**в**).

Аннотация. Термическая обработка олигопептидов является одним из методов синтеза органических наноструктур. Однако нагрев может привести не только к самоорганизации исходных молекул, но и к химическим реакциям, приводящим к образованию новых неожиданных наноструктур или изменению свойств существующих.

В настоящей работе впервые с помощью атомно-силового микроскопа визуализирована твёрдофазная химическая реакция. Изучалась реакция циклизации дипептида L-лейцил-L-лейцина в твёрдом состоянии при нагревании Изменение морфологии тонкой плёнки дипептида и образование наноструктур после нагревания было визуализировано с использованием атомно-силовой микроскопии. Этот метод также использовался для демонстрации различий в самосборке линейных и циклических дипептидов. Химическая структура продукта реакции характеризовалась ЯМР-спектрометрией, спектроскопией FTIR и анализом ГХ-МС.

Результаты, полученные в настоящей работе, полезны для объяснения изменений свойств наноструктур на основе короткоцепных олигопептидов, особенно лейцил-лейцина, после термической обработки, а также для синтеза циклических олигопептидов.

Лаборатория физики и химии поверхности КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН, кафедра физической химии КФУ.

Исполнители: Зиганшина С.А. (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН), Зиганшин М.А., Сафиуллина А.С., Герасимов А.В., Климовицкий Е.Е., Хаяров Х.Р., Горбачук В.В. (КФУ)

Публикации:

1. Ziganshin M.A., Safiullina A.S., Gerasimov A.V., Ziganshina S.A., Klimovitskii A.E., Khayarov K.R., Gorbatchuk V.V.: Thermally induced self-assembly and cyclization of L-leucyl-L-leucine in solid state. J. Phys. Chem. B. **121**, 8603−8610 (2017)
2. Safiullina A.S., Ziganshin M.A., Ziganshina S.A., Bukharaev A.A.: The self-organization of leucyl-leucine and cyclo(leucyl-leucine) dipeptides by the AFM method // Abstracts of the International Conference on Scanning Probe Microscopy (SPM-2017), Ekaterinburg, Ural Federal University, Russia, August 28–30, 2017. P. 109.

Важнейшие результаты, готовые к практическому применению

Впервые показана возможность создания кристаллических композиционных материалов на основе тонких слоёв Ag:Si и Ag:GeSi с плазмонными наночастицами Ag комбинированием низкоэнергетической высокодозной ионной имплантации и последующего лазерного отжига мощными наносекундными импульсами. Лазерный отжиг аморфных имплантированных слоёв проводился с плотностями энергии, превышающей порог плавления Si. В результате получены и исследованы композиционные слои с кристаллической структурой и пониженной шероховатостью поверхности (до 3 нм), в которых синтезированы наночастицы Ag с характерными размерами 5–15 нм и 40–60 нм, демонстрирующие плазмонный резонанс вблизи длины волны 830 нм. Полученные новые материалы перспективны для их применения в оптоэлектронике и солнечной энергетике. (Работа выполнена в рамках проектов РНФ и РФФИ_офи). *Руководитель*: А. Л. Степанов (группа нанооптики и нанофотоники)

Итоги конкурса научных работ сотрудников КФТИ 2017 года

В рамках ежегодной итоговой конференции КФТИ КазНЦ РАН проведён конкурс научных работ за 2017 год.

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

1-е место:

– Тарасов В.Ф., Суханов А.А. (КФТИ), Дудникова В.Б. (МГУ), Жариков Е.В., Лис Д.А., Субботин К.А. (ИОФ РАН): “Димерная самоорганизация примесных ионов иттербия в монокристаллах синтетического форстерита”

2-е место:

– Шахмуратов Р.Н.: “Преобразование частотно-модулированного излучения в последовательность коротких импульсов с помощью метода резонансной фильтрации через ансамбль щелочных атомов”

3-е место:

– Зарипов Р.Б., Хайруждинов И.Т., Вавилова Е.Л., Воронкова В.К., Салихов К.М., Катаев В.Е.: “Модификация протокола Карра-Парселла-Мейбума-Гилла для измерения времен фазовой релаксации”

НАУЧНЫЕ СООБЩЕНИЯ

Высокочувствительный рабочий элемент для многоразовых люминесцентных термометров на основе застеклованной плёнки бета-дикетонатного комплекса европия(III)

Д. В. Лапаев, В. Г. Никифоров, В. С. Лобков, Ю. Г. Галяметдинов

Отдел когерентной и нелинейной оптики, лаборатория быстропротекающих молекулярных процессов

Создан новый термочувствительный материал с интенсивной люминесценцией ионов Eu^{3+}, эффективно возбуждаемой светом в области 280–415 нм. Материал представляет собой застеклованную плёнку толщиной 20 мкм (закреплённую между двумя кварцевыми пластинами), приготовленную из порошка мезогенного бета-дикетонатного комплекса европия(III). Материал обратимо изменяет интенсивность и время затухания люминесценции ионов Eu^{3+} в диапазоне температур 298–348 К, характеризуется рекордной температурной чувствительностью времени затухания люминесценции –6.5 мкс · $К^{-1}$, полной устойчивостью к УФ-излучению и высоким оптическим качеством. Исследования показали, что созданный материал является высокоэффективным рабочим элементом для многоразовых люминесцентных термометров пригодных для длительного мониторинга температуры в диапазоне 298–348 К.

Введение

Температура является одним из важнейших факторов, влияющих на огромное количество процессов в повседневной жизни людей, наукоёмких производствах и режимах эксплуатации технических средств. В связи с этим на сегодняшний день создано большое количество способов измерения температуры, в том числе с помощью сенсоров [1]. Сенсоры условно можно разделить на две большие группы в зависимости от природы контакта, находящегося между ними и анализируемыми объектами: контактные (например, биметаллические термометры, термопары, пирометры и термисторы) и бесконтактные (оптические сенсоры). Тенденцией последнего времени является растущий спрос на бесконтактные сенсоры температуры, который обусловлен бурным развитием оборонной, аэрокосмической, химической, авиационной и автомобильной промышленности, биомедицины, электронной техники, молекулярной фотоники.

Среди бесконтактных сенсоров температуры возрастающую популярность имеют люминесцентные термометры, принцип работы которых основан на изменении эмиссионных свойств (например, интенсивности или времени затухания люминесценции) рабочего элемента в зависимости от температуры [2, 3]. Такие устройства позволяют измерять распределение температуры по поверхности материала с микро- и нанометровым пространственным разрешением. Помимо этого их отличительными качествами являются надёжность, миниатюрность, простота использования, электробезопасность, низкая себестоимость, высокая чувствительность и скорость отклика, функционирование в присутствие сильных электромагнитных помех [2].

Рабочий элемент люминесцентного термометра должен удовлетворять ряду требований, среди которых наиболее важными являются монохроматическая люминесценция с большим Стоксовым сдвигом, высокий квантовый выход, время затухания люминесценции более 1 мкс, низкая чувствительность люминесценции к кислороду, высокая температурная чувствительность, высокая фотостабильность и возможность возбуждения люминесценции видимым светом [1, 3]. Большинству данных требований удовлетворяют бета-дикетонатные комплексы европия(III), являющиеся одним из наиболее эффективных излучателей монохроматической люминесценции в красной области спектра [4]. Главная проблема их прикладного использования в люминесцентных термометрах заключается в низкой устойчивости к деструктивному воздействию УФ-излучения [5–11]. Помимо этого данные соединения обладают низкой поглощательной способностью в видимой области спектра

[5, 7, 12–14], что вынуждает использовать для возбуждения люминесценции дорогие источники УФ-света.

Повысить устойчивость бета-дикетонатных комплексов европия(III) к УФ-излучению можно путём их внедрения в различные твёрдые матрицы (например, полимеры, жидкие кристаллы, органико-неорганические гибридные материалы, кремниевые наночастицы) [2, 3, 7, 10]. Однако на практике такие дорогостоящие подходы не приводят к полному решению проблемы [7, 12].

Применение в прикладных задачах источников УФ-света для возбуждения люминесценции считается нецелесообразным (например, они характеризуются низкой совместимостью с пластиковыми оптическими элементами, низкой яркостью и высокой стоимостью по сравнению со светодиодами, излучающими в видимой области спектра). Поэтому особую актуальность имеет задача синтеза новых бета-дикетонатных комплексов европия(III) и создания на их основе фотостабильных материалов, способных ярко люминесцировать при возбуждении видимым светом.

Известные на сегодняшний день способы получения бета-дикетонатных комплексов европия(III) с полосой поглощения в видимой области спектра сводятся к модификации бета-дикетонатных лигандов [7, 15], присоединению к комплексам сложных хромофоров [6, 8, 16] или внедрению комплексов в полимерные матрицы [5]. Такие подходы позволяют в ряде случаев существенно повысить фотостабильность люминесцентных материалов с широкой полосой поглощения, тем не менее, они имеют множество технологических ограничений (например, непросто подобрать органический растворитель совместимый как с полимером, так и с комплексом), препятствующих их коммерческому применению.

Мы предложили альтернативный подход, решающий проблему низкой фотостабильности бета-дикетонатных комплексов лантаноидов(III) и позволяющий контролировать фотофизические свойства материалов на их основе (например, ширину полосы поглощения и интенсивность люминесценции) [17–21]. Данный подход, основанный на синтезе нового класса соединений – мезогенных бета-дикетонатных комплексов лантаноидов(III), позволяет создавать из порошков комплексов люминесцентные материалы в виде застеклованных плёнок. С помощью этого подхода мы приготовили из бета-дикетонатного комплекса $Eu(CPDK_{3\text{-}5})_3phen$ [$CPDK_{3\text{-}5}$ – 1-(4-(4-пропилциклогексил)фенил)октан-1,3-дион, phen – 1,10-фенантролин] (см. рис. 1) застеклованную плёнку и проанализировали возможность её применения в качестве рабочего элемента люминесцентных термометров. Эксперименты показали, что плёнка, закреплённая между двумя кварцевыми пластинами, характеризуется эффективной поглощательной способностью в фиолетовом диапазоне (385–415 нм) видимого спектра, интенсивной люминесценцией ионов Eu^{3+} на длине волны 612 нм, полной устойчивостью к УФ-излучению и способностью обратимо изменять интенсивность и время затухания люминесценции в области температур 298–348 К.

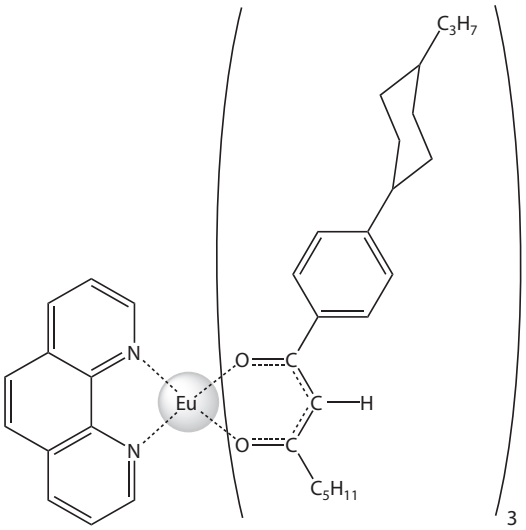


Рис. 1. Молекулярная структура бета-дикетонатного комплекса $Eu(CPDK_{3\text{-}5})_3phen$.

Экспериментальная часть

Порошок комплекса $Eu(CPDK_{3\text{-}5})_3phen$ был синтезирован в соответствии с работами [17–20]. К горячему спиртовому раствору, содержащему 0.12 ммоль бета-дикетона $CPDK_{3\text{-}5}$, 0.04 ммоль лиганда phen и 0.125 ммоль KOH при перемешивании медленно прикапывали спиртовой раствор $EuCl_3 \cdot 6H_2O$ (0.04 ммоль). Образовавшийся светло-жёлтый осадок выделяли горячей фильтрацией, промывали горячим спиртом и сушили в вакууме. Затем продукт растворяли в толуоле, и полученный раствор высушивали в вакууме. Выход: 70%. Аналитически вычислено для $C_{81}H_{107}EuN_2O_6$: C, 71.71; H, 7.95; N 2.06; Eu, 11.20. Найдено: C 71.66; H, 8.01; N 2.02; Eu, 11.50. Температура перехода в состояние изотропного расплава: 403 К.

Структура полученного соединения подтверждена с помощью элементного анализа. Температуры фазовых переходов порошка комплекса $Eu(CPDK_{3\text{-}5})_3phen$ определены с помощью поляризационного оптического микроскопа Olympus BX-51, оснащённого высокоточной нагревательной системой Lincam.

Термочувствительный элемент (застеклованная плёнка) был получен из порошка комплекса $Eu(CPDK_{3\text{-}5})_3phen$. Методика приготовления следующая. Небольшое количество порошка комплекса было помещено между двумя кварцевыми пластинами (размером 7×15×0.5 мм), находящимися на поверхности нагревательного столика поляризационного микроскопа Olympus BX-51. Путём нагрева порошок был переведён в состояние расплава. При последующем быстром охлаждении расплав стекловался, образуя прозрачную плёнку толщиной около 20 мкм.

Спектр пропускания зарегистрирован с помощью спектрофотометра Perkin-Elmer, Lambda 35 при температуре 298 К. Спектр люминесценции при температуре 298 К, а также кинетические кривые люминесценции в диапазоне

температур 298–348 К получены на автоматизированном оптическом спектрометре [22]. Источником возбуждения люминесценции служил импульсный азотный лазер ЛГИ-21 (длина волны 337 нм, длительность импульса 10 нс, частота повторения импульсов 100 Гц, средняя мощность 2.1 мВт). При облучении образца лазерным пучком со средней мощностью 0.17 мВт существенных изменений фотофизических свойств плёнки во время регистрации спектра люминесценции не наблюдалось. Площадь облучаемой поверхности плёнки составляла 7 мм^2.

Регистрация кинетических кривых люминесценции в диапазоне температур 298–348 К осуществлялась с использованием системы температурной стабилизации. Для анализа кинетических кривых люминесценции было использовано моноэкспоненциальное разложение:

$$I(t) = A\exp(-t/\tau), \quad (1)$$

где $I(t)$ – интенсивность люминесценции, A – предэкспоненциальный фактор, а τ – время затухания люминесценции.

Фотостабильность при температуре 298 К исследовалась путём мониторинга зависимости средней интенсивности люминесценции на длине волны 612 нм от длительности лазерного облучения:

$$\langle t \rangle \propto A \cdot \tau. \quad (2)$$

Относительная температурная чувствительность средней интенсивности люминесценции ($S_I^{(r)}$), абсолютная ($S_\tau^{(a)}$) и относительная ($S_\tau^{(r)}$) температурные чувствительности времени затухания люминесценции на длине волны 612 нм были вычислены из соотношений $S_I^{(r)} = \Delta I/(I_{ref}\Delta T)$, $S_\tau^{(a)} = \Delta\tau/\Delta T$ и $S_\tau^{(r)} = \Delta\tau/(\tau_{ref}\Delta T)$, где ΔI и $\Delta\tau$ – изменения средней интенсивности люминесценции и времени затухания люминесценции с изменением температуры ΔT; I_{ref} и τ_{ref} – величины средней интенсивности люминесценции и времени затухания люминесценции при температуре 298 К.

Спектр возбуждения люминесценции получен при температуре 298 К на установке, собранной на основе двух модернизированных монохроматоров МДР-2 и МДР-12 [23]. Спектр возбуждения регистрировался в области 230–450 нм путём изменения длины волны возбуждающего света и мониторинга интенсивности люминесценции на длине волны 612 нм.

Фотография застеклованной плёнки при дневном свете была получена с использованием цифровой камеры Nikon Coolpix P340.

Результаты и обсуждение

Ранее было показано, что порошок комплекса Eu(CPDK$_{3-5}$)$_3$phen, нагретый до температуры перехода в состояние изотропного расплава (~403 К), при охлаждении стеклуется [20]. Данные свойства комплекса позволили получить из него новый термочувствительный люминесцентный материал, представляющий собой застеклованную плёнку толщиной около 20 мкм, закреплённую между двумя кварцевыми пластинами. В данном образце плёнка выступает в качестве термочувствительного элемента, а кварцевые пластины защищают плёнку от контакта с атмосферным кислородом (см. рис. 2). Плёнка стабильна при комнатной температуре, обладает высокой прозрачностью (90%) в области длин волн 450–700 нм (см. рис. 2) и, как показали длительные эксперименты, остаётся прозрачной в течение месяцев. Данные поляризационной оптической микроскопии подтверждают, что плёнка оптически изотропна, однородна и не содержит кристаллических включений. Подобного типа плёнки уже были описаны в литературе [19–21]. Важно отметить, что застеклованную плёнку невозможно получить из немезогенных бета-дикетонатных комплексов лантаноидов(III) из-за их высоких температур плавления (443–543 К) [4] и склонности к кристаллизации.

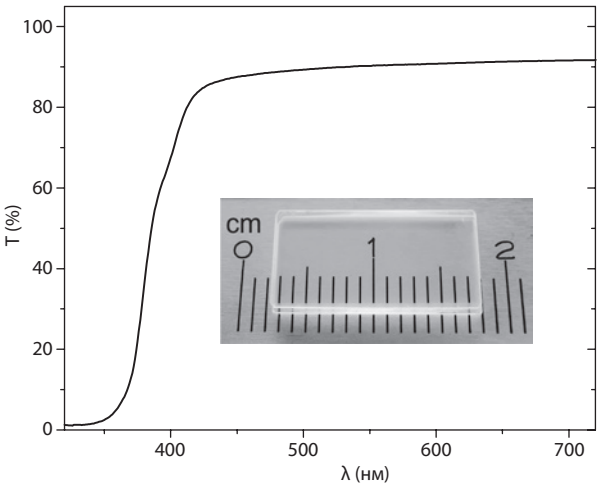


Рис. 2. Спектр пропускания застеклованной плёнки Eu(CPDK$_{3-5}$)$_3$phen при температуре 298 К. На вставке приведена фотография плёнки, закреплённой между двумя кварцевыми пластинами (размером 7×15×0.5 мм).

При комнатной температуре спектр люминесценции плёнки при задержке 10 мкс относительно возбуждающего лазерного импульса (длина волны 337 нм) состоит из узких эмиссионных полос, соответствующих переходам с нижнего эмиссионного $^5D_0$-уровня на подуровни основного терма ^7F_J (J = 0–4 в наших экспериментах) иона Eu^{3+} (см. рис. 3). Наиболее интенсивная полоса с максимумом на длине волны 612 нм соответствует переходу $^5D_0 \rightarrow {}^7F_2$. Эмиссионные полосы с максимумами на длинах волн 579, 592, 652 и 701 нм соответствуют переходам $^5D_0 \rightarrow {}^7F_0$, $^5D_0 \rightarrow {}^7F_1$, $^5D_0 \rightarrow {}^7F_3$ и $^5D_0 \rightarrow {}^7F_4$ [25]. Комплекс Eu(CPDK$_{3-5}$)$_3$phen в твёрдом состоянии демонстрирует относительно высокий абсолютный квантовый выход люминесценции (0.3–0.32 при температуре 300 К) среди мезогенных бета-дикетонатных комплексов европия(III) [24]. Спектр возбуждения люминесценции плёнки (при регистрации на длине волны 612 нм) состоит из широкой полосы с максимумом на длине волны 398 нм (см. рис. 3). Эта полоса соответствует синглет-синглетным пере-

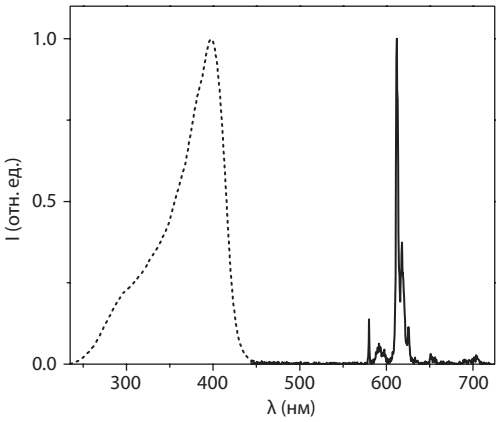


Рис. 3. Спектры возбуждения (штрих) и люминесценции (сплошная линия) плёнки $Eu(CPDK_{3\text{-}5})_3phen$.

ходам в лигандах и указывает на координацию иона Eu^{3+} к лигандам. Возбуждение иона Eu^{3+} происходит через внутримолекулярный перенос энергии. Присутствие в спектре люминесценции плёнки только эмиссионных полос иона Eu^{3+} свидетельствует об эффективном протекании процесса переноса энергии от лигандов к металу.

Как уже было отмечено, бета-дикетонатные комплексы европия(III) характеризуются низкой устойчивостью к УФ-излучению [5–11]. Данная проблема препятствует созданию на их основе люминесцентных термометров, позволяющих осуществлять длительный мониторинг температуры. Рисунок 4 показывает, что облучение плёнки азотным лазером со средней мощностью 0.17 мВт в течении 270 минут при температуре 298 К не приводит к изменению средней интенсивности люминесценции ионов Eu^{3+} на длине волны 612 нм. Важно отметить, что такой мощности лазера достаточно для детектирования (с помощью установки описанной в экспериментальной части) люминесценции с высоким соотношением сигнал/шум (см. рис. 3).

Мы исследовали влияние температуры на интенсивность и время затухания люминесценции ионов Eu^{3+} в плёнке. Как видно из рис. 5, средняя интенсивность

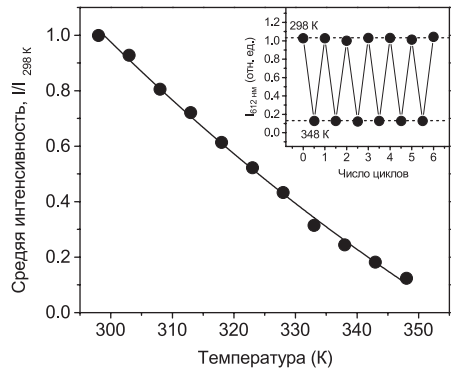


Рис. 5. Нормированная температурная зависимость средней интенсивности люминесценции перехода $^5D_0 \rightarrow {}^7F_2$ (612 нм) для плёнки $Eu(CPDK_{3\text{-}5})_3phen$. Сплошная линия соответствует аппроксимационной функции $29.1 \cdot \exp(-T/127.6)$ (T – температура) с коэффициентом детерминации $r^2 = 0.9968$. На вставке показано изменение средней интенсивности люминесценции во время шести последовательных циклов нагрева до температуры 348 К и охлаждения до температуры 298 К.

люминесценции на длине волны 612 нм уменьшается в 8 раз при увеличении температуры от 298 до 348 К. Изменение сигнала люминесценции полностью обратимо, что было подтверждено с помощью шести последовательных циклов нагрева образца до температуры 348 К и охлаждения до температуры 298 К (см. рис. 5).

Величина относительной температурной чувствительности средней интенсивности люминесценции $S_I^{(r)}$ на длине волны 612 нм изменяется от $-2.2\% \cdot K^{-1}$ при температуре 298 К до $-1.5\% \cdot K^{-1}$ при температуре 348 К. Среднее значение $S_I^{(r)}$ составляет $-1.8\% \cdot K^{-1}$ (см. рис. 6).

Хорошо известно, что интенсивность люминесценции существенно зависит от характеристик образца и условий эксперимента [2–4]. Помимо этого, существенный вклад в ошибку измерения температуры может вносить фактор деградации образца под действием облучения. Напротив, время затухания люминесценции не зависит от данных факторов и поэтому является более точным методом измерения температуры [2, 3].

На рис. 7а показано влияние температуры в диапазоне 298–348 К на время затухания люминесценции

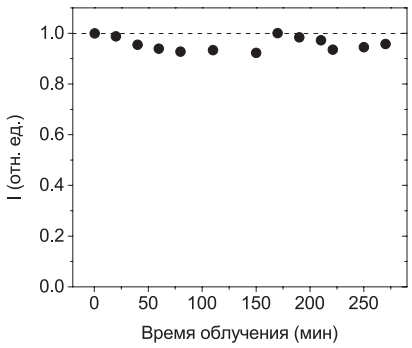


Рис. 4. Зависимость нормированной средней интенсивности люминесценции перехода $^5D_0 \rightarrow {}^7F_2$ (612 нм) от продолжительности лазерного облучения (длина волны 337 нм, средняя мощность 0.17 мВт) для плёнки $Eu(CPDK_{3\text{-}5})_3phen$.

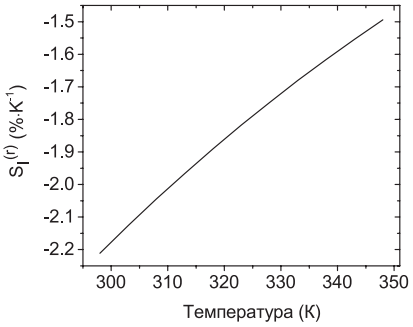
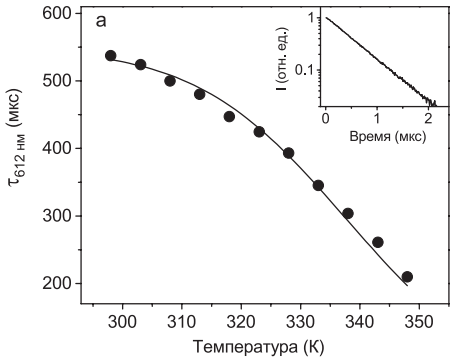


Рис. 6. Относительная температурная чувствительность средней интенсивности люминесценции перехода $^5D_0 \rightarrow {}^7F_2$ (612 нм) для плёнки $Eu(CPDK_{3\text{-}5})_3phen$.



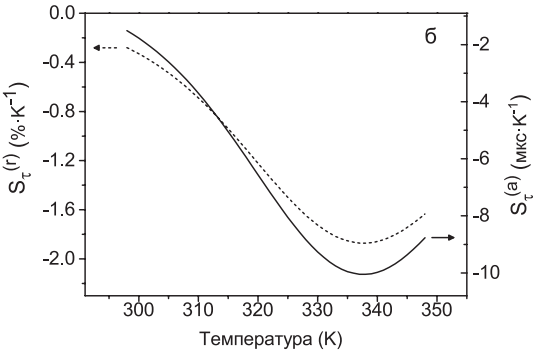


Рис. 7. а Температурная зависимость времени затухания люминесценции (закрашенные кружки – экспериментальные данные, сплошная линия – моделирование) для плёнки $Eu(CPDK_{3\text{-}5})_3phen$. На вставке показана кинетика люминесценции при 298 К. **б** Абсолютная (сплошная линия) и относительная (штрих) температурная чувствительность времени затухания люминесценции для плёнки $Eu(CPDK_{3\text{-}5})_3phen$.

τ на длине волны 612 нм. Кинетика люминесценции во всём температурном диапазоне хорошо аппроксимируется моноэкспоненциальной функцией (см. вставку на рис. 7а). Величина τ составляет 537 мкс при температуре 298 К и уменьшается до 210 мкс при нагревании до температуры 348 К.

На рис. 7б показана чувствительность времени затухания люминесценции на длине волны 612 нм к изменению температуры в области 298–348 К. Плёнка демонстрирует высокую абсолютную температурную чувствительность времени затухания люминесценции $S_\tau^{(a)}$. Величина $S_\tau^{(a)}$ варьируется от –1.5 мкс · К$^{-1}$ при температуре 298 К до –8.8 мкс · К$^{-1}$ при температуре 348 К со средним значением –6.5 мкс · К$^{-1}$. Величина относительной температурной чувствительности времени затухания люминесценции $S_\tau^{(r)}$ изменяется от –0.28% · К$^{-1}$ при температуре 298 К до –1.6% · К$^{-1}$ при температуре 348 К с τ_{ref} = 537 мкс. Среднее значение величины $S_\tau^{(r)}$ составляет –1.2% · К$^{-1}$ и является одним из самых больших для термочувствительных плёночных материалов на основе бета-дикетонатных комплексов европия(III), эффективно поглощающих свет в фиолетовом диапазоне видимого спектра (см. таблицу 1).

На рис. 8 показано изменение величины времени затухания люминесценции τ на длине волны 612 нм во время шести последовательных циклов нагрева плёнки до температуры 348 К и охлаждения до температуры 298 К. Эксперименты показали, что величина τ при температурах 298 и 348 К не изменяется во время циклов нагрева-охлаждения. Этот важный экспериментальный факт указывает на полную обратимость температурной зависимости величины τ. Принимая во внимание высокую фотостабильность плёнки $Eu(CPDK_{3\text{-}5})_3phen$ (см. рис. 4), можно заключить, что материал может быть многократно использован в качестве рабочего элемента люминесцентных термометров для длительного измерения температуры в области температур 298–348 К.

Для сравнения рабочих характеристик термочувствительного материала на основе застеклованной плёнки $Eu(CPDK_{3\text{-}5})_3phen$ некоторые из лучших термочувствительных плёночных материалов на основе бета-дикетонатных комплексов европия(III), эффективно поглощающих свет

Таблица 1. Сравнение рабочих характеристик застеклованной плёнки $Eu(CPDK_{3\text{-}5})_3phen$ и лучших плёночных материалов на основе бета-дикетонатных комплексов европия(III), эффективно поглощающих свет в фиолетовом диапазоне видимого спектра.

Сенсорная плёнка	[а]λ_{max} (нм)	Рабочий диапазон температур (К)	[б]Диапазон времён затухания (мкс)	[в]$S_\tau^{(a)}$ (мкс · К$^{-1}$)	[г]$S_\tau^{(r)}$ (% · К$^{-1}$)	[и]Деградация (%/час)	Ссылка
$Eu(CPDK_{3\text{-}5})_3phen$	398	298–348	537–210	–6.5	–1.2[д]	нет	данная работа
$Eu(tta)_3DEADIT$ / PMAN	416	274–323	360–130	–4.7	–1.3[е]	20	[8]
$Eu(DTP)_3$ / 3C-PU	412	283–323	380–200	–4.5	–1.2[ж]	–	[26]
Eu(tdap) / PMMA	410	289–343	340–150	–3.5	–1.0[з]	17	[27]

[а] Длина волны, соответствующая максимуму спектра возбуждения.
[б] В рабочем интервале температур.
[в] Средняя величина абсолютной температурной чувствительности времени затухания люминесценции = $\Delta\tau/\Delta T$, где Δτ – изменение времени затухания люминесценции с изменением температуры.
[г] Средняя величина относительной температурной чувствительности времени затухания люминесценции = $\Delta\tau/(\tau_{ref}\Delta T)$, где τ_{ref} – величина времени затухания люминесценции при заданной температуре.
[д] τ_{ref} = 537 мкс при 298 К.
[е] τ_{ref} = 360 мкс при 274 К.
[ж] τ_{ref} = 380 мкс при 283 К.
[з] τ_{ref} = 340 мкс при 289 К.
[и] Уменьшение интенсивности в час.

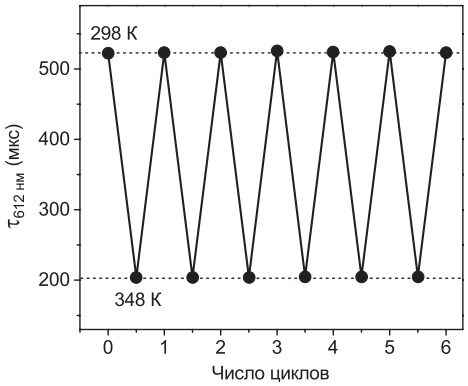


Рис. 8. Изменение времени затухания люминесценции τ ионов Eu^{3+} на длине волны 612 нм в плёнке $Eu(CPDK_{3\text{-}5})_3phen$ во время шести последовательных циклов нагрева до температуры 348 К и охлаждения до температуры 298 К.

в фиолетовом диапазоне видимого спектра, приведены в таблице 1.

Анализ данных оптической спектроскопии показал, что предложенный в данной работе материал не уступает аналогам по интенсивности люминесценции, способности эффективно преобразовывать свет в области 405 нм в интенсивную монохроматическую люминесценцию ионов Eu^{3+} и средней величине $S_\tau^{(r)}$. Как видно из спектра возбуждения застеклованной плёнки (см. рис. 3), люминесценция ионов Eu^{3+} может быть эффективно возбуждена не только дорогими источниками УФ-света, но и дешёвыми светодиодами с длиной волны в области 390–415 нм. Важно отметить, что если в случае аналогов широкая полоса возбуждения достигается за счёт химической модификации бета-дикетонатных лигандов или присоединения к комплексу сложного хромофора (эффективно поглощающего свет в видимой области), то в случае застеклованной плёнки широкая полоса возбуждения достигается путём настройки её локальной структуры. При этом наш материал имеет ряд весомых преимуществ по сравнению с аналогами. Первое преимущество заключается в простоте изготовления фотостабильного термочувствительного люминесцентного материала. Технология приготовления термочувствительных плёночных материалов на основе классических бета-дикетонатных комплексов европия(III) основана на внедрении данных соединений в полимерные матрицы для защиты от фотодеградации и контакта с кислородом. При этом возникает ряд химических и технологических проблем [6–8]. Например, непросто подобрать органический растворитель, совместимый и с полимером и комплексом [6, 8]. Также нелегко подобрать полимерную матрицу, которая заблокирует доступ кислорода к термочувствительному элементу и защитит его от фотодеградации. Как видно из таблицы 1, даже в полимерных матрицах комплексы подвергаются фотодеградации [8, 27]. Для приготовления термочувствительной застеклованной плёнки $Eu(CPDK_{3\text{-}5})_3phen$ нужен только порошок комплекса и две кварцевые пластины, защищающие плёнку от взаимодействия с атмосферным кислородом (см. рис. 2). При этом плёнка полностью устойчива к деструктивному воздействию УФ-излучения (см. рис. 4). Второе преимущество – высокое оптическое качество. Третье преимущество – рекордная температурная чувствительность –6.5 мкс · $К^{-1}$ и способность обратимо изменять интенсивность и время затухания люминесценции ионов Eu^{3+} в диапазоне 298–348 К. Эти уникальные свойства позволяют многократно использовать застеклованную плёнку для продолжительного мониторинга температуры в диапазоне 298–348 К.

Заключение

В данной работе мы исследовали в области температур 298–348 К фотофизические и фотохимические свойства нового термочувствительного люминесцентного материала, представляющего собой застеклованную плёнку $Eu(CPDK_{3\text{-}5})_3phen$, закреплённую между двумя кварцевыми пластинами (см. рис. 2). При создании плёнки с полосой поглощения и возбуждения в фиолетовом диапазоне видимого спектра был использован подход, описанный в работах [18–21]. Созданный материал выгодно отличается от аналогов простотой изготовления, полной устойчивостью к деструктивному воздействию УФ-излучения, рекордной температурной чувствительностью времени затухания люминесценции –6.5 мкс · $К^{-1}$ и способностью обратимо изменять интенсивность и время затухания люминесценции ионов Eu^{3+} в области температур 298–348 К. Принимая во внимание высокую прозрачность плёнки в области длин волн 450–700 нм и способность эффективно преобразовывать световую энергию в диапазоне длин волн 280–415 нм в интенсивную монохроматическую люминесценцию ионов Eu^{3+}, мы заключаем, что застеклованная плёнка $Eu(CPDK_{3\text{-}5})_3phen$, закреплённая между двумя кварцевыми пластинами, является перспективным высокочувствительным рабочим элементом для многоразовых люминесцентных термометров, пригодных для длительного мониторинга температуры в диапазоне 298–348 К.

Литература

1. Childs P.R.N., Greenwood J.R., Long C.A.: Rev. Sci. Instrum. **71**, 2959–2978 (2000)
2. Wang Xu-dong, Wolbeis O.S., Meier R.J.: Chem. Soc. Rev. **42**, 7834–7869 (2013)
3. Brites C.D.S., Millán A., Carlos L.D.: Handbook on the physics and chemistry of rare earths (Bünzli J.-C.G., Pecharsky V.K., eds.), pp. 339–427. Amsterdam: Elsevier 2016.
4. Binnemans K.: Handbook on the physics and chemistry of rare earths (Gschneidner Jr. K.A., Bünzli J.-C.G., Pecharsky V.K., eds.), pp. 107–272. Amsterdam: Elsevier 2005.
5. Borisov S.M., Klimant I.: Anal. Bioanal. Chem. **404**, 2797–2806 (2012)
6. Borisov S.M., Wolfbeis O.S.: Anal. Chem. **78**, 5094–5101 (2006)
7. Khalil G.E., Lau K., Phelan G.D., Carlson B., Gouterman M., Callis J.B., Dalton L.R.: Rev. Sci. Instrum. **75**, 192–206 (2004)
8. Borisov S., Klimant I.: J. Fluoresc. **18**, 581–589 (2008)

9. Gameiro C.G., da Silva Jr. E.F., Alves Jr. S., de Sá G.F., Santa-Cruz P.A.: J. Alloys Comp. **323-324**, 820–823 (2001)
10. Kai J., Felinto M.C.F.C., Nunes L.A.O., Malta O.L., Brito H.F.: J. Mater. Chem. **21**, 3796–3802 (2011)
11. Gameiro C.G., da Silva Jr. E.F., Alves Jr. S., de Sá G.F., Santa-Cruz P.A.: Mater. Sci. Forum **315-317**, 249–256 (1999)
12. Basu B.B.J., Vasantharajan N.: J. Lumin. **128**, 1701–1708 (2008)
13. Mitsuishi M., Kikuchi S., Miyashita T., Amao Y.: J. Mater. Chem. **13**, 2875–2879 (2003)
14. Kozak M., Kalota B., Tkaczyk S., Tsvirko M.: J. Appl. Spectrosc. **81**, 678–683 (2014)
15. Zelelow B., Khalil G.E., Phelan G., Carlson B., Gouterman M., Callis J.B., Dalton L.R.: Sens. Actuators B **96**, 304–314 (2003)
16. Yu J., Sum L., Peng H., Stich M.I.J.: J. Mater. Chem. **20**, 6975–6981 (2010)
17. Galyametdinov Yu.G., Knyazev A.A., Dzhabarov V.I., Cardinaels T., Driesen K., Görller-Walrand C., Binnemans K., Adv. Mater. **20**, 252–257 (2008)
18. Knyazev A.A., Molostova E.Yu., Krupin A.S., Heinrich B., Donnio B., Haase W., Galyametdinov Yu.G.: Liq. Cryst. **40**, 857–863 (2013)
19. Lapaev D.V., Nikiforov V.G., Safiullin G.M., Lobkov V.S., Salikhov K.M., Knyazev A.A., Galyametdinov Y.G.: Opt. Mater. **37**, 593–597 (2014)
20. Knyazev A.A., Krupin A.S., Molostova E.Yu., Romanova K.A., Galyametdinov Yu.G.: Inorg. Chem. **54**, 8987–8993 (2015)
21. Lapaev D.V., Nikiforov V.G., Safiullin G.M., Lobkov V.S., Knyazev A.A., Krupin A.S., Galyametdinov Yu.G.: J. Lumin. **175**, 106–112 (2016)
22. Лапаев Д.В., Никифоров В.Г., Сафиуллин Г.М., Галявиев И.Г., Лобков В.С., Галяметдинов Ю.Г.: Казанский физико-технический институт им. Е. К. Завойского 2008. Ежегодник. Казань: КФТИ КазНЦ РАН 2009. с. 37.
23. Сафиуллин Г.М., Никифоров В.Г., Жарков Д.К., Лобков В.С.: Казанский физико-технический институт им. Е. К. Завойского 2011. Ежегодник, Казань: КФТИ КазНЦ РАН 2012. с. 63.
24. Romanova K.A., Datskevich N.P., Taidakov I.V., Vituknovskii A.G., Galyametdinov Yu.G.: Russ. J. Phys. Chem. A **87**, 2108–2111 (2013)
25. Hüfner S.: Optical spectra of transparent rare earth compounds. New York: Academic Press 1978. 237 p.
26. Ondrus V., Meier R.J., Klein C., Henne U., Schäferling M., Beifuss U., Sens. Actuators A **233**, 434–441 (2015)
27. Lam H., Rao G., Loureiro J., Tolosa L.: Talanta **84**, 65–70 (2011)

Модификация протокола Карра-Парселла-Мейбума-Гилла для измерения времён фазовой релаксации

Р. Б. Зарипов, И. Т. Хайруждинов, , Е. Л. Вавилова, В. К. Воронкова, К. М. Салихов, В. Е. Катаев

Отдел химической физики, лаборатория спиновой физики и спиновой химии; отдел физики перспективных материалов, лаборатория физики ферроиков и функциональных материалов

В импульсной ЭПР спектроскопии обычно имеют дело с селективным характером возбуждения. При этом в экспериментах Карра-Парселла-Мейбума-Гилла (КПМГ) наряду с первичным эхо и его рефокусировками наблюдаются другие сигналы эха. Эти так называемые нежелательные сигналы эхо накладываются на эхо КПМГ, в результате анализ результата усложняется. В работе предложен один из возможных подходов к решению данной проблемы путём модификации протокола КПМГ.

Введение

Одним из требований, предъявляемых к потенциальной элементной базе устройств квантовой памяти, являются достаточно длинные времена релаксации, в особенности время фазовой релаксации. В импульсной ЭПР-спектроскопии обычно используется два протокола измерения времени фазовой релаксации. Первый – это протокол первичного электронного спинового эха (ЭСЭ), в котором амплитуда сигнала эха измеряется как функция межимпульсного интервала [1, 2]. Второй – многоимпульсный протокол Карра-Парселла-Мейбума-Гилла (КПМГ), в котором первые два импульса формируют сигнал ЭСЭ, а последующие π-импульсы создают его рефокусировки [3, 4]. Из анализа затухания сигналов эха можно найти характеристические времена декогеренции спинов. Одним из основных механизмов декогеренции электронных спинов является спектральная диффузия, вызванная случайной модуляцией сверхтонкого взаимодействия. Нами было ранее показано [5], что многоимпульсный протокол КПМГ позволяет существенно уменьшить вклад спектральной диффузии в декогеренцию спинов, так что измеренное в КПМГ эксперименте время декогеренции оказывается больше, чем это же время, измеренное по спаду сигнала первичного спинового эха. Поэтому в настоящее время возрастает интерес к многоимпульсному протоколу КПМГ в экспериментах по динамическому декаплингу [6, 7], а также в импульсных экспериментах для повышения чувствительности отдельных протоколов (двойной электронный резонанс, двойной электрон-ядерный резонанс и др.) [8, 9]. Известно, что стандартные КПМГ протоколы хорошо работают в случае полного возбуждения спектра ЭПР (неселективное по частоте возбуждение спинов), когда полоса возбуждения микроволновым импульсом гораздо больше ширины спектра ЭПР. Однако, в большинстве случаев ситуация обратная. Поэтому в ЭПР-экспериментах характер возбуждения носит селективный характер. В случае селективного возбуждения профиль возбуждения используемых импульсов становится более сложным, так, например, привычный π/2-импульс при неселективном возбуждении таковым не является для всех спинов в случае селективного возбуждения. Поэтому в импульсных экспериментах при увеличении количества импульсов появляются нежелательные сигналы эха. Особенно негативно вклад нежелательных сигналов эха сказывается в протоколе КПМГ, ввиду большого количества подаваемых импульсов.

В данной работе мы предлагаем некоторую модификацию протокола КПМГ для устранения нежелательных сигналов эха. Необходимо отметить, что впервые в импульсной ЭПР-спектроскопии нежелательные вклады в протоколе КПМГ были наблюдены и предлагались варианты устранения их в работах [10, 11], а также в недавней работе [9].

Эксперимент

Тестирование протокола КПМГ осуществляли на монокрисалле оксамидато-комплекса меди, разбавленного изоструктурным комплексом с немагнитными ионами никеля, структура которого показана на рис. 1. Оксамидато-

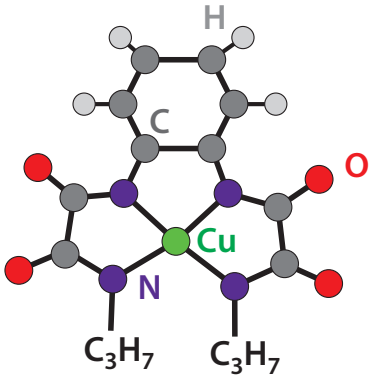


Рис. 1. Структура анионного фрагмента изучаемого комплекса $[Cu(opbon\text{-}Pr2)]^{2-}$.

комплексы с ионами металлов, в частности с ионами меди, рассматриваются в качестве элементарных звеньев для синтеза перспективных полиметаллических комплексов. Данные соединения могут рассматриваться в качестве возможных кандидатов для использования в молекулярных электронных устройствах. Измерения проводились на спектрометре Elexsys E580 в Q-диапазоне частот при T = 20 К. Спектрометр оборудован стандартным резонатором EN5107D2, помещённым в проходной криостат CF935. Контроль температуры осуществляли с помощью блока управления ITC 503.

Ввиду того, что данный кристалл изучался ранее [12, 13], все параметры спин-гамильтониана в работе не приводятся. Однако необходимо отметить, что спектр ЭПР данного монокристалла при $\mathbf{H}\|\mathbf{z}$ представляет собой квартет линий (S = 1/2, I_{Cu} = 3/2), каждая из которых расщеплена сверхтонким взаимодействием с ядрами азота ($I(^{14}N)$ = 1). При $\mathbf{H}\perp\mathbf{z}$ все линии сливаются практически в одну. Для определённости все дальнейшие данные приводятся для ориентации $\mathbf{H}\|\mathbf{z}$, для крайней левой линии. Необходимо отметить, что измерения проводились и для других ориентаций и на других компонентах спектра ЭПР, но существенных отличий замечено не было. Моделирование откликов системы на микроволновые импульсы проводилось в пакете Mathematica с использованием формализма матрицы плотности.

Результаты и их обсуждение

На рис. 2 показаны импульсные протоколы для измерения времён фазовой релаксации. На рис. 3 показан результат применения протокола КПМГ.

Из рис. 3 видно, что формы сигналов эха при определённых ослаблениях микроволной мощности искажены. Для π/2-импульса при ослаблении микроволновой мощности до 6 дБ интенсивность сигнала первичного эха максимальна, хотя форма последующих сигналов все ещё искажена. При уменьшении мощности импульсов форма сигналов эха становится более симметричной. Например, при ослаблении до 14 дБ амплитуда первого и второго эха практически выравнивается. Можно предположить,

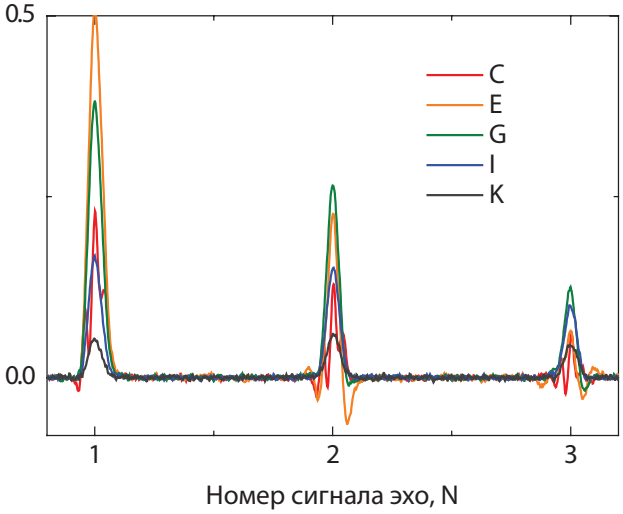


Рис. 3. Сигналы эха, проявляющиеся в эксперименте КПМГ при разных значениях ослабления микроволновой мощности. Длительность π/2 импульса 16 нс, межимпульсный интервал τ = 300 нс.

что при этом ослаблении получаются более оптимальные условия для формирования сигнала стимулированного эха (N = 2). Тогда становится понятным, что при определённых величинах ослабления микроволновой мощности некоторые спины “недокручиваются”, а другие “перекручиваются” импульсами. В результате формируемые сигналы эха в определённые моменты времени в условиях неселективного возбуждения накладываются друг на друга и создают несиметричные сигналы эха (см. рис. 3).

Если рассмотреть формирование сигналов эха в трёхимпульсном эксперименте [2] $\{t_{p1}\text{-}\tau\text{-}t_{p2}\text{-}T\text{-}t_{p3}\text{-}\ldots\}$, то получается, что каждая пара импульсов формирует сигналы первичного эха $\{PE_{12}, PE_{13}, PE_{23}\}$ в моменты времени $\{2\tau, 2t\tau + 2T, \tau + 2T\}$, три импульса формируют сигнал стимулированного эха SE_{123} в момент времени $2\tau + T$ и рефокусированное первичное эхо от первых двух импульсов $RPE_{12} - 2T$. Так как в протоколе КПМГ интервал $T = 2\tau$, то сигналы SE_{123} и RPE_{12} формируются в одно и тоже время. Аналогичным образом можно рассмотреть результат действия большего количества импульсов. Однако ввиду того, что после n-го импульса

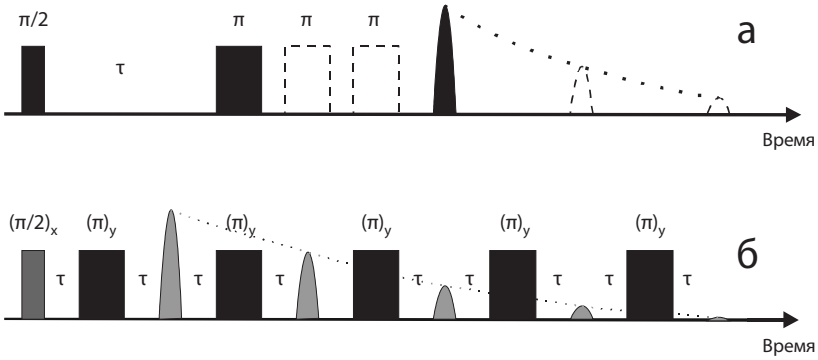


Рис. 2. Импульсные протоколы измерения времени фазовой релаксации: **а** первичное эхо, **б** КПМГ.

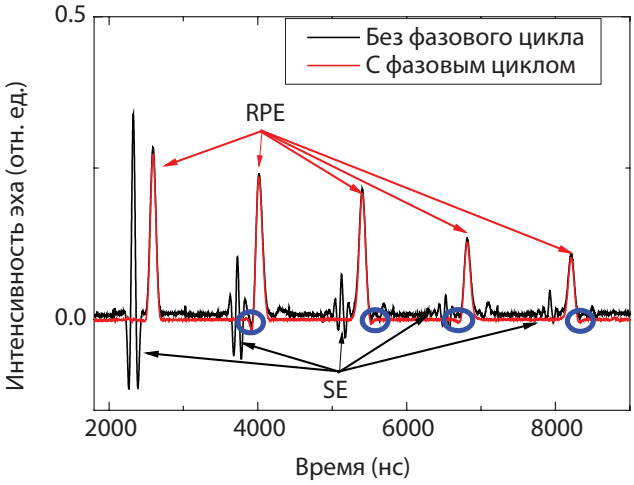


Рис. 4. Сравнение модифицированного протокола КПМГ $(t_{p1})_x$-τ_1-$(2t_{p1})_{\{y/-y\}}$-τ_1-эхо-$\{\tau_2$-$(2t_{p1})_y$-τ_2-эхо$\}^{n-1}$ с использованием (красный) и без использования (чёрный) фазового циклирования. Параметры эксперимента t_{p1} = 26 нс, τ_1 = 400 нс, τ_2 = 700 нс. Синими кругами отмечены не устранённые вклады.

формируется $0.5(3^{(n-1)} - 1)$ сигналов эха данное рассмотрение опустим [2].

Таким образом, для того, чтобы разнести накладывающийся сигнал стимулированного эха от рефокусированного, предлагается время T в последовательности КПМГ брать отличным от 2τ. То есть модифицированный протокол КПМГ будет иметь вид: $(\pi/2)_x$-τ_1-$(\pi)_y$-τ_1-эхо-$\{\tau_2$-$(\pi)_y$-τ_2-эхо$\}^{n-1}$.

В импульсной спектроскопии магнитного резонанса неплохие результаты устранения нежелательных вкладов показывает использование фазового циклирования, которое заключается в попеременной подаче микроволновых импульсов с разной фазой [2, 14]. Этот подход предпринимался и в последовательности КПМГ [9]. Однако, ввиду сложности расчёта, полноценного фазового цикла не было предложено. В настоящей работе предпринята попытка рассчитать простое фазовое циклирование, позволяющее устранять нежелательные вклады. На рис. 4 показан результат действия модифицированного протокола КПМГ с использованием фазового циклирования по второму импульсу.

В первом проходе фаза второго импульса {+y}, во втором – {–y}, затем результат обоих экспериментов суммируется. Несложными манипуляциями удаётся неплохо устранить нежелательные вклады стимулированного эха. Однако стоит отметить, что данный фазовый цикл не позволяет полностью устранить все нежелательные вклады (артефакты помещены в круги на рис. 4).

В результате были измерены времена фазовой релаксации в протоколе первичного эха (T_m^{PE}) и последовательностью КПМГ (T_m^{CPMG}) (таблица 1). Отметим, что спад огибающей амплитуд сигналов эха в протоколе первичного эха описывался законом $y = A\exp(-2\tau/T_m)^b + y_0$ с b = 0.8–1.0 (в зависимости от температуры), тогда как для модифицированного протокола КПМГ спад моноэкспоненциальный b = 1.

Таблица 1. Температурная зависимость времён поперечной релаксации монокристалла оксамидато-комплекса меди, приведённая для двух протоколов: первичное эхо (PE) и модифицированный КПМГ (CPMG).

Температура (К)	T_m^{PE} (нс)	T_m^{CPMG} (нс)
10	388	2088
20	358	1824
50	345	672
80	342	464

Видно, что протокол КПМГ позволяет получить более длинные времена фазовой релаксации, что свидетельствует о влиянии эффектов спектральной диффузии в исследуемом соединении. Более детальное описание механизмов релаксации, вносящих вклад в разрушение когерентности в системе можно найти в работе [15].

Благодарности

Эта работа выполнена совместно с Берндом Бюхнером (Институт физики твёрдого тела и материаловедения, Германия). Авторы благодарны Мухамеду Абдулмалику, Тобиасу Рюфферу (Технический университет Кемница, Германия) за предоставленные образцы. Работа частично поддержана Программой фундаментальных исследований Президиума РАН № 1.26П.

Литература

1. Салихов К.М., Семенов А.Г., Цветков Ю.Д.: Электронное спиновое эхо и его применение. Новосибирск: Изд-во Наука, Сибирское отделение 1976. с. 343.
2. Schweiger A., Jeschke G.: Principles of Pulse Electron Paramagnetic Resonance. Oxford Univ. Press 2001. p. 608.
3. Carr H.Y., Purcell E.M.: Phys. Rev. **94**, No. 3, 630–638 (1954)
4. Meiboom S., Gill D.: Rev. Sci. Instrum. **29**, No. 8, 688–691 (1958)
5. Zaripov R., Vavilova E., Miluykov V., Bezkishko I., Sinyashin O., Salikhov K., Kataev V., Büchner B.: Phys. Rev. B **88**, 094418_1-8 (2013)
6. Mitrikas G., Efthimiadou E.K., Kordas G.: Phys. Chem. Chem. Phys. **2**, No. 1, 2378–2383 (2013)
7. Ali Ahmed M.A., Álvarez G.A., Suter D.: Phys. Rev. A **87**, No. 4, 3–8 (2013)
8. Mentink-Vigier F., Collauto A., Feintuch A., Kaminker I., Tarle V., Goldfarb D.: J. Magn. Reson. **236**, 117–125 (2013)
9. Mitrikas G., Prokopiou G.: J. Magn. Reson. **254**, 75–85 (2015)
10. Eliav U., Freed J.H.: Rev. Sci. Instrum. **54**, No. 10, 1416–1417 (1983)
11. Kurshev V.V., Raitsimring A.M.: J. Magn. Reson. **88**, No. 1, 126–129 (1990)
12. Aliabadi A., Zaripov R., Salikhov K., Voronkova V., Vavilova E., Abdulmalic M.A., Rüffer T., Büchner B., Kataev V.: J. Phys. Chem. B **119**, No. 43, 13762–13770 (2015)
13. Abdulmalic M.A., Aliabadi A., Petr A., Krupskaya Y., Kataev V., Büchner B., Zaripov R., Vavilova E., Voronkova V., Salikov K., Hahn T., Kortus J., Eya'ane Meva F., Schaarschmidt D., Rüffer T.: Dalt. Trans. **44**, No. 17, 8062–8079 (2015)
14. Stoll S., Kasumaj B.: Appl. Magn. Reson. **35**, No. 1, 15–32 (2007)
15. Zaripov R.,Vavilova, E., Khairuzhdinov I., Salikhov K., Voronkova V., Abdulmalic M.A., Meva F.E., Weheabby S., Rüffer T., Büchner B., Kataev V.: Beilstein J. Nanotechnol. **8**, 943–955 (2017)

Самоорганизация трипептида глицил-глицил-глицин в плёнках до и после взаимодействия с парами органических веществ

А. С. Морозова, С. А. Зиганшина, А. А. Бухараев

Лаборатория физики и химии поверхности

Методами атомно-силовой микроскопии исследована самоорганизация трипептида глицил-глицил-глицин в плёнке под действием паров органических соединений и воды.

Введение

В настоящее время значительный интерес исследователей привлекают короткоцепные пептиды (олигопептиды). Материалы на их основе биосовместимы, обладают биологической активностью и повышенной термостабильностью. Главной особенностью олигопептидов, вызвавшей большой интерес, является их способность к самоорганизации с образованием разнообразных структур: наночастиц, нановолокон, наностержней, нанопроводов, нанотрубок, наносфер, нанопузырьков и т.д. [1, 2]. Биосовместимые материалы на основе олигопептидов обладают уникальными свойствами и потенциальными преимуществами для различных технологий: оптика и энергетика, медицина, материаловедение и др. [3–5]. Такие наноструктуры используются в сенсорных системах для селективного обнаружения нейротоксинов [6], в качестве шаблонов для получения металлических нанопроводов и неорганических нанотрубок [7], для изготовления композитных материалов для устройств хранения энергии [8], как транспортные системы для доставки ДНК в живых клетках [9], трансмембранные каналы [10], а также для создания супергидрофобных поверхностей [11]. Глицин входит в состав многих белков и биологически активных соединений. В организме человека используется в качестве источника энергии и участвует в синтезе глюкозы, играет важную роль в функционировании мозга [12]. Ди- и трипептид на основе глицина являются также биологически активными соединениями, являются источником глицина в организме человека. Исследования свойств триипептида на основе глицина (глицил-глицил-глицин) представляют большой интерес в связи с возможностью его использования при производстве биологически активных и лекарственных препаратов.

В связи с большим многообразием наноструктур, способных формироваться из олигопептидов исследования морфологии их поверхности является актуальной задачей. В настоящей работе с помощью метода атомно-силовой микроскопии (АСМ) исследована самоорганизация трипептида на основе глицина на различных по природе подложках, а также оценено влияние паров органических соединений на морфологию поверхности плёнок трипептида.

Методика эксперимента

В качестве объекта настоящего исследования был использован трипептид глицил-глицил-глицин (GGG). Раствор трипептида с концентрацией 1 мг/мл готовился путём растворения точной навески в смеси метанол-вода (в соотношении 1:1). В качестве подложек были использованы три гладкие, отличающиеся по своим свойствам, поверхности: гидрофобный высокоориентированный пиролитический графит (ВОПГ), гидрофильная слюда и монокристаллический кремний. Монокристаллический кремний обладает гидрофильной поверхностью, однако, в отличие от свежего скола слюды, не несет на себе отрицательный заряд. Перед каждым экспериментом подложки очищались. На поверхность подложек методом капельного испарения наносилось 40 мкл раствора трипептида с концентрацией 1 мг/мл в смеси метанол-вода (в соотношении 1:1). После испарения растворителя проводилась сушка плёнки потоком теплого воздуха (45 °C) в течение двух минут. Температура и влажность воздуха при приготовлении образцов контролировались с помощью термометра-гигрометра психрометрического ВИТ-2.

Подложку с нанесённой плёнкой помещали в чашку Петри, на дно которой было нанесено 200 мкл растворителя. Не допускалось прямого контакта жидкого растворителя и образца. Далее чашку Петри герметизировали парафиновой плёнкой и выдерживали в течение определённого времени (от 30 минут до 29 часов) при комнатной температуре от 21 до 26 °C и влажности воздуха 60–83%. После насыщения проводилась сушка образца в потоке теплого воздуха 45 °C. Для насыщения плёнок GGG парами использовались этанол, способный образовывать водородные связи с трипептидом, а также дихлорометан, который водородные связи с трипептидом не образует.

Морфология поверхности плёнок олигопептидов до и после насыщения парами органических соединений

исследовалась методом атомно-силовой микроскопии на приборе Solver P47Pro (НТ-МДТ, Россия), с использованием стандартных кремниевых кантилеверов NSG-11 (НТ-МДТ, Россия) с резонансной частотой колебания от 114 до 259 кГц.

Результаты и обсуждение

АСМ изображения морфологии поверхности плёнок трипептида глицил-глицил-глицин, нанесённых на поверхности различных подложек, приведены на рис. 1. Толщина плёнок составляет ~100 нм. Были использованы 3 типа подложек: ВОПГ, слюда и кристаллический кремний. Установлено, что природа подложки оказывает значительное влияние на самоорганизацию трипептида. На поверхности слюды в процессе высыхания капли раствора образуется аморфная плёнка (рис. 1а), среднеквадратичная шероховатость (RMS) на скане 30×30 мкм составляет 1.6 нм. Тогда как на поверхности ВОПГ (рис. 1б) и кремния (рис. 1в) аморфная плёнка формируется только в результате принудительного удаления растворителя потоком теплого воздуха (45 °С). Среднеквадратичная шероховатость на соответствующих сканах составляет 21.9 и 15.9 нм. Следует отметить, что на всех плёнках присутствуют углубления, глубина которых меньше толщины плёнки.

В настоящей работе также было изучено влияние паров органических соединений, относящихся к двум разным классам, на морфологию поверхности плёнок.

На рис. 2 приведены АСМ изображения морфологии поверхности плёнок, с образовавшимися на них наноструктурами в результате взаимодействия плёнки GGG с парами этанола. Было установлено, что независимо от природы подложки на поверхности плёнки формируются кристаллические структуры (рис. 2), отличающиеся формой и размером. Так, на поверхности слюды (рис. 2а) после взаимодействия с парами этанола плёнка GGG самоорганизуется с образованием прямоугольных кристаллов с длиной от 500 нм до 1.3 мкм, шириной от 300 нм до 1.2 мкм, высота кристаллов составляет 100–300 нм. На поверхности ВОПГ (рис. 2б) наблюдаются узкие кристаллы с длиной до 450 нм и шириной 118–370 нм. На поверхности кремния (рис. 2в) после взаимодействия с парами этанола наблюдается формирование кристаллических

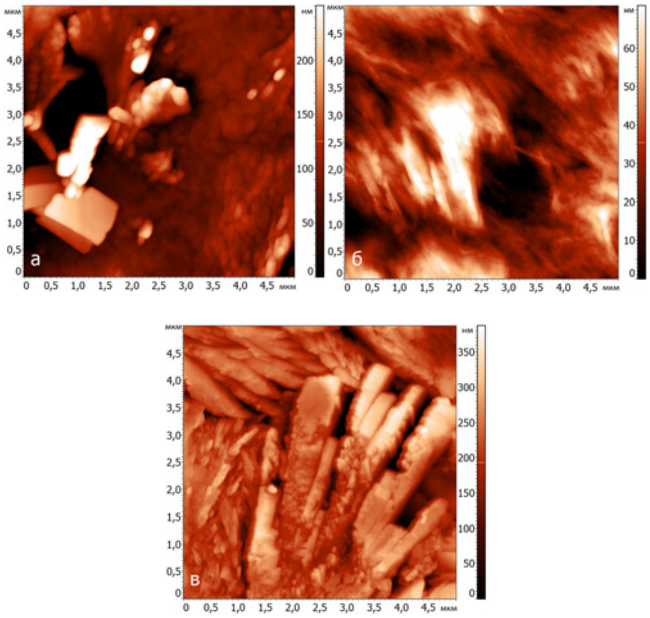


Рис. 2. АСМ изображения плёнки GGG на поверхности слюды (**а**), ВОПГ (**б**) и кремния (**в**) после насыщения парами этанола.

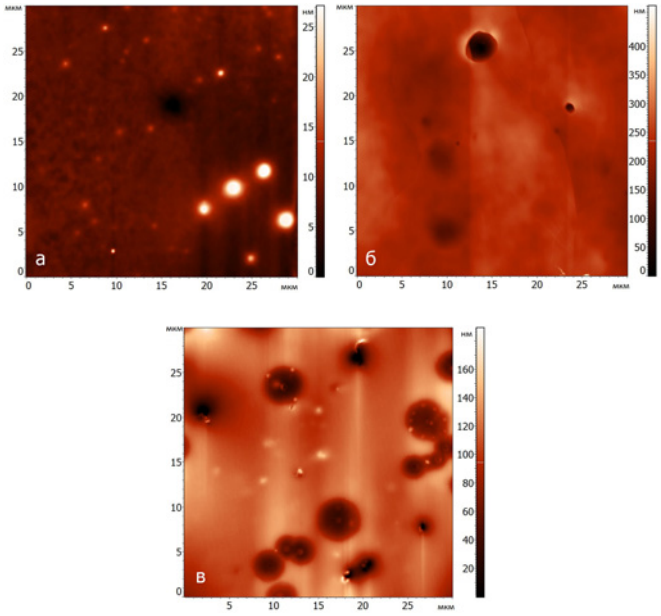


Рис. 1. АСМ изображения исходной плёнки GGG на поверхности слюды (**а**), ВОПГ (**б**) и кремния (**в**).

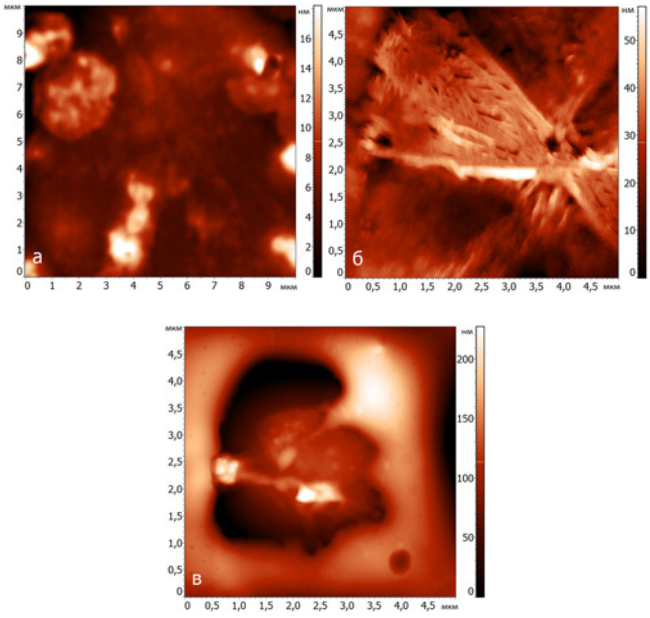


Рис. 3. АСМ изображения плёнки GGG на поверхности слюды (**а**), ВОПГ (**б**) и кремния (**в**), после насыщения парами дихлорометана.

структур с плоской поверхностью. Размеры плоской области составляют 1.9–3.4 мкм по длине, 340 нм – 1 мкм по ширине. Высота кристаллов составляет 140–450 нм.

При насыщении аморфной плёнки трипептида парами дихлорометана, неспособного в отличие от этанола к специфическим взаимодействиям с GGG, используемая подложка оказывает существенное влияние на конечный результат этого взаимодействия (рис. 3). При использовании в качестве подложки слюды (рис. 3а) или кремния (рис. 3в) плёнка GGG после взаимодействия с дихлорометаном набухает, а в некоторых случаях на её поверхности образуются разрывы глубиной до 150 нм. Насыщение парами дихлорометана плёнки GGG, нанесённой на поверхность ВОПГ (рис. 3б), приводит к формированию кристаллических структур, исходящих в виде расширяющихся лучей из единого центра длиной от 3 мкм.

Выводы

Там образом, показано, что на формирование наноструктур на поверхности аморфной плёнки трипептида глицил-глицил-глицин существенное влияние оказывает тип используемой подложки в том случае, если плёнка насыщается парами дихлорометана, неспособного образовывать водородные связи с трипептидом. Для этого соединения образование кристаллических структур наблюдалось только на поверхности ВОПГ. По-видимому, слабое взаимодействие плёнки трипептида с гидрофобной подложкой не препятствует процессу самоорганизации GGG с формированием кристаллических наноструктур. Если же плёнка GGG нанесена на гидрофильную слюду или монокристаллический кремний, то в результате более сильных взаимодействий “плёнка-подложка” по сравнению со взаимодействиями “плёнка-пар” формирование кристаллических наноструктур затруднено. При использовании паров этанола, способного образовывать водородные связи с трипептидом, кристаллизация аморфной плёнки GGG происходит независимо от природы подложки. Но и в этом случае, полученные на разных подложках наноструктуры отличаются размерами и формой.

Авторы выражают благодарность Зиганшину М.А. (КФУ) за предоставленные образцы.

Литература

1. Guo C., Luo Y., Zhou R., Wei G.: Nanoscale No. 6 (2014)
2. Smith A.M., Banwell E.F., Edwards W.R., Pandya M.J., Woolfson D.N.: Adv. Funct. Mater. No. 16 (2006)
3. Busseron E., Ruff Y., Moulin E., Giuseppone N.: Nanoscale No. 5 (2013)
4. Hamley I.W.: Angew. Chem. Int. Ed. No. 53 (2014)
5. Ma H., Fei J., Li Q., Li J.: Small No. 11 (2015)
6. Kim J.H.: Biosensors and Bioelectronics No. 26 (2011)
7. Gao X., Matsui H.: Adv. Mater. No. 17 (2005)
8. Ryu J.: ACS Nano No. 4 (2010)
9. Yan X.H.: Angew. Chem., Int. Ed. No. 46 (2007)
10. Lee J.S.: Soft Matter No. 5 (2009)
11. Kim S., Kim J.H., Lee J.S., Park C.B.: Small No. 11 (2015)
12. Habibi N., Kamaly N., Memic A., Shafiee H.: Nano Today No. 20 (2016)
13. Akram M., Altaf M., Kabir-ud-Din: Biointerfaces No. 82 (2011)

Влияние спин-решёточной релаксации на частоту модуляции спада сигнала электронного спинового эха ион-радикальной пары $P_{700}^{+}A_1^{-}$ фотосистемы 1 в трегалозной матрице при изменении температуры

А. А. Суханов, К. М. Салихов

Отдел химической физики, лаборатория спиновой физики и спиновой химии

Главное наблюдение в этой работе – уменьшение частоты модуляции спада сигнала первичного спинового эха кофактора P_{700}^{+} в реакционном центре фотосистемы 1 в трегалозной матрице при повышении температуры от 150 К до комнатной температуры. Мы склоняемся к тому, что этот факт не даёт оснований делать вывод, что при нагревании увеличивается расстояние между P_{700}^{+} и A_1^{-} спинами. Этот факт может быть вполне приписан влиянию спин-решёточной релаксации спина A_1^{-}. Насколько нам известно, это первое наблюдение эффекта сдвига наблюдаемой частоты модуляции спада сигналов спинового эха, вызванной диполь-дипольным взаимодействием между спинами, за счёт влияния на спиновую динамику спин-решёточной релаксации. Замедление частоты динамического движения, обусловленного влиянием спин-решёточной релаксации на проявление в эксперименте диполь-дипольного взаимодействия между спинами, можно рассматривать как проявление квантового эффекта Зенона в динамике спинов в условиях взаимодействия спинов с решёткой.

Введение

Дисахарид треголаза препятствует денатурации белков, вызванный замораживанием, нагреванием и сушкой. Существующая парадигма защитного механизма нативной структуры белков трегалозой основана на предположении о том, что трегалоза препятствует динамики белков [1–3]. Это предположение представляется весьма интересным, но оно требует детализации и подтверждений. Действительно, в присутствии трегалозы реакционный центр сохраняет свои функции при изменении внешних условий: температуры и влажности. Феноменологически это можно объяснить, по крайней мере, двумя путями. Один путь (назовём его путь А) состоит в том, что трегалоза каким-то образом поддерживает неизменными структуру и состав реакционного центра (РЦ) фотосистемы 1. Другой путь (назовём его путь В) состоит в том, что внешние условия меняют структуру и состав РЦ, но трегалоза создаёт условия для того, чтобы изменения в РЦ были обратимыми. В выборе между этими двумя путями протекторного влияния трегалозы на функционирование РЦ ФС 1 могут помочь исследования с помощью методов ЭПР спектроскопии. Применение ЭПР спектроскопии для определения структурных характеристик РЦ, например, расстояния между кофакторами РЦ, основано на измерении энергии спин-спинового диполь-дипольного взаимодействия между разделёнными зарядами. Это взаимодействие зависит от расстояния r между разделёнными зарядами

$$H_{\text{d-d}} = [(g_1 g_2 \beta^2 (1 - \cos^2\theta)/r^3)/\hbar] S_{1z} S_{2z} \ . \qquad (1)$$

Здесь g_k, S_{kz}, $k = 1, 2$, g-факторы и проекции оператора спинового момента разделённых зарядов на направление внешнего постоянного магнитного поля B_0, которое выбрано в качестве оси квантования спинов, β – магнетон Бора, θ – угол между направлением внешнего магнитного поля и радиус-вектором, соединяющим электронные спины на доноре электрона (P_{700}^{+}) и акцепторе электрона (A_1^{-}).

Хорошо известно, что спад сигнала первичного электронного спинового эха разделённых зарядов РЦ осциллирует с частотой, которая определяется спин-спиновым диполь-дипольным взаимодействием между разделёнными зарядами в РЦ [4, 5]. Ожидаемая частота модуляции спада сигнала первичного спинового эха равна

$$\omega_{\text{d-d}} = (g_1 g_2 \beta^2 (1 - \cos^2\theta)/r^3)/\hbar \ . \qquad (2)$$

Отсюда видно, что частота модуляции спада сигнала спинового эха (ESEEM) от расстояния r между спинами разделённых зарядов и от ориентации РЦ относительно направления внешнего магнитного поля. РЦ в образце ориентированы случайным образом. В этой ситуации функция распределения частоты модуляции имеет особенность: наибольший статистический вес имеет частота, которая соответствует ориентации $\theta = \pi/2$ [6], т.е. в эффекте ESEEM проявляется только частота

$$\omega_{\text{d-d}} \equiv \Omega = (g_1 g_2 \beta^2/r^3)/\hbar \ . \qquad (3)$$

Из приведённых рассуждений напрашивается следующая стратегия. Из экспериментов по электронному спиновому эхо можно найти частоту модуляции спада сигналов эха и затем с помощью формулы (3) определить расстояние между двумя разделёнными зарядами, по-существу, между двумя кофакторами РЦ. Однако, в эксперименте наблюдаемая частота модуляции спада сигналов эха может несколько отличаться от диполь-дипольной частоты (3). Теоретически было показано [4, 5], что из-за случайных переворотов спинов в ходе спин-решёточной релаксации

в эксперименте частота модуляции сигнала спинового эха оказывается меньше, чем собственно дипольная частота (3). Этот эффект аналогичен хорошо известному эффекту уменьшения частоты колебаний маятника из-за трения.

В реакционном центре спины разделённых зарядов должны иметь разные скорости спин-решёточной релаксации, так как спин электрона на хиноне взаимодействует со спинами железо-сернистых комплексов. Согласно теории [5], в спад сигнала спинового эха спина P^+_{700} диполь-дипольное взаимодействие со спином электрона на A^-_1 вносит вклад

$$V(2\tau) = \{[\cos(R\tau) + (1/(2T_1R))\sin(R\tau)]^2 + (\omega_{d\text{-}d}/(2R))^2\sin^2(R\tau)[1 - 2\langle\sin^2(\varphi/2)\rangle]\}\exp(-\tau/T_1) \ . \quad (4)$$

(Отметим, что в работе [4] ошибочно написано, что частота случайных переворотов спина W в ходе спин-решёточной релаксации связана с временем спин-решёточной релаксации T_1 соотношением $1/T_1 = W$. Правильное соотношение $1/T_1 = 2W$ (см., напр., [5])).

В этом уравнении T_1 – время спин-решёточной релаксации спина электрона на A^-_1, φ – это угол поворота спина A^-_1 вторым СВЧ импульсом, который формирует первичное спиновое эхо спина электрона P^+,

$$R = (1/2)\omega_{d\text{-}d}\sqrt{1 - 1/(\omega_{d\text{-}d}T_1)^2} \ . \quad (5)$$

В случае разделённых зарядов в РЦ линии спектров ЭПР P^+_{700} и A^-_1 мало перекрываются, поэтому в экспериментах по наблюдению сигнала спинового эха спинов P^+ вероятность $p = \langle\sin^2(\varphi/2)\rangle$ возбуждения СВЧ импульсами, формирующими наблюдаемый сигнал эха, спинов A^-_1 должна быть меньше единицы.

В связи с уравнением (4) следует отметить, что для проявления диполь-дипольного взаимодействия между спинами разделённых зарядов в виде модуляции спада сигнала спинового эха важное значение имеют как характер возбуждения спинов пары СВЧ импульсами, возбуждающими сигнал эха, так и случайные перевороты спинов, вызванные спин-решёточной релаксацией. Предположим, что скорость спин-решёточной релаксации равна нулю. Тогда уравнение (4) переходит в

$$V(2\tau) = (1 + p\cos(\omega_{d\text{-}d}\tau)) \ . \quad (6)$$

Это уравнение хорошо известно в теории двойного электрон-электронного резонанса (см., напр., [6]). Из уравнения (6) видно, без случайных переворотов спинов в ходе спин-решёточной релаксации диполь-дипольное взаимодействие вызывает модуляцию сигнала спинового эха только если второй СВЧ импульс, формирующий сигнал эха, возбуждает в какой-то мере оба спина взаимодействующей пары.

Если СВЧ импульсы, формирующие сигнал спинового эха, не возбуждают спин партнёра того спина, от которого наблюдается сигнал эха, т.е. в уравнении (4) $p = \langle\sin^2(\varphi/2)\rangle = 0$ то вклад диполь-дипольного взаимодействия в паре разделённых зарядов в спад сигнала спинового эха описывается уравнением (4) при $p = 0$ [4]:

$$V(2\tau) = \{[\cos(R\tau) + (1/(2T_1R))\sin(R\tau)]^2 + (\omega_{d\text{-}d}/(2R))^2\sin^2(R\tau)\}\exp(-\tau/T_1) \ . \quad (7)$$

В отличие от ситуации ур. (6) согласно ур. (7) случайные перевороты спинов в ходе спин-решёточной релаксации могут вызвать модуляцию спада сигналов спинового эха даже если $p = 0$ при достаточно длинных временах спин-решёточной релаксации T_1, когда выполняется условие

$$\omega_{d\text{-}d}T_1 > 1 \ . \quad (8)$$

При выполнении этого условия согласно уравнениям (4, 7) ESEEM эффект описывется слагаемыми, пропорциональными $\sin(2R\tau)$ и $\cos(2R\tau)$, которые осциллируют с угловой частотой, которая равна

$$\Omega_{mod} = 2R = \omega_{d\text{-}d}\sqrt{1 - 1/(\omega_{d\text{-}d}T_1)^2} \ . \quad (9)$$

Когда $\omega_{d\text{-}d}T_1 \gg 1$, частота модуляции наблюдаемого сигнала спинового эха приближается к дипольной частоте $\omega_{d\text{-}d}$. Уравнение (9) можно переписать как

$$\Omega_{mod} = \omega_{d\text{-}d}\sqrt{1 - 1/x^2} \ , \quad x = \omega_{d\text{-}d}T_1, \quad x > 1 \ . \quad (10)$$

Рисунок 1 иллюстрирует уменьшение частоты модуляции спада сигнала эха по отношению к дипольной частоте, $f = \Omega_{mod}/\omega_{d\text{-}d}$, с уменьшением параметра x – отношения дипольной частоты и скорости спин-решёточной релаксации.

Из этого рисунка видно, что при заданной дипольной частоте с увеличением скорости спин-решёточной релаксации, т.е. с уменьшением параметра x, частота модуляции уменьшается. При достижении $x = 1$ и дальнейшем уменьшении x эффект модуляции спада сигнала эха исчезает.

Рис. 1 показывает, что в области медленной спин-решёточной релаксации, при $x = \omega_{d\text{-}d}\ T_1 \geq 4$, частота модуляции спада сигнала эха выходит на предел $\Omega_{mod} = \omega_{d\text{-}d}$. В области быстрой спин-решёточной релаксации, при

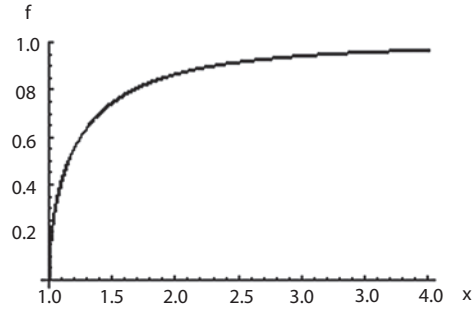


Рис. 1. Зависимость $f = \Omega_{mod}/\omega_{d\text{-}d}$ от x.

$x = \omega_{d\text{-}d} T_1 \leq 1$, $\Omega_{mod} = 0$, то есть модуляция спада сигнала спинового эха за счёт диполь-дипольного взаимодействия между разделёнными зарядами исчезает.

Приведённые теоретические результаты показывают, что даже при наличии случайной модуляции спин-спинового взаимодействия переворотами спинов в ходе спин-решёточной релаксации метод электронного спинового эха в принципе позволяет извлечь из экспериментальных данных весьма слабые диполь-дипольные взаимодействия между спинами разделённых зарядов в РЦ, если спин-решёточная релаксация спинов не слишком быстрая. Время спин-решёточной релаксации обычно зависит от температуры. Это значит, что наблюдаемая в эксперименте частота модуляции спада сигналов спинового эха может проявлять температурную зависимость как из-за изменения расстояния между спинами разделённых зарядов в РЦ (термическое расширение), так и из-за температурной зависимости спин-решёточной релаксации спинов.

В этой работе мы использовали модуляцию спада сигнала первичного спинового эха разделённых зарядов в РЦ ФС1 для определения расстояния между спинами электронов P^+_{700} и A^-_1 РЦ фотосистемы 1 в трегалозной матрице при разных температурах.

Изученные системы

Пигмент-белковые комплексы фотосистемы-1 (ФС1) были выделены из клеток цианобактерий Synechocystis sp. PCC 6803 [7]. После чего были подготовлены растворы комплексов ФС1 с трегалозой в молярном соотношение 1:40000, соответственно. Для получения трегалозных матриц полученный раствор высушивался в присутствии насыщенных водных растворов соли LiCl. При высушивании в присутствии соли LiCl достигалась влажность 11% за время экспозиции 14 дней.

Метод исследования

В наших экспериментах мы использовали импульсный метод так называемого первичного электронного спинового эха. Измерения проводились в Q (33.72 ГГц) диапазоне частот. Протокол эксперимента показан на рис. 2

Результаты исследования

Методом ВР ЭПР в Q-диапазоне (33.7 ГГц) СВЧ было зарегистрировано спин-поляризованное состояние радикальной пары фотоситемы-1 (PS1)в трегалозной матрице при 11% влажности. Наблюдаемый спектр свидетельствует о формировании неравновесной поляризации электронных спинов в спин-коррелированной паре разделённых зарядов и имеет тип E/A/E/A (E – испускание, A – поглощение). Наблюдаемый спектр при комнатной температуре имеет типичную форму для радикальной пары, полученную

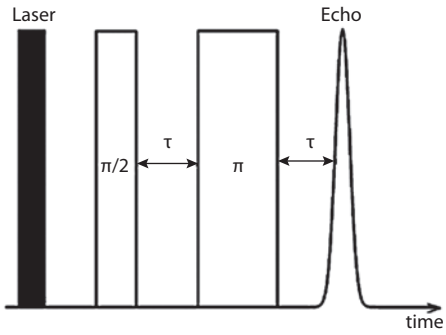


Рис. 2. Протокол эксперимента. Лазерный импульс создаёт пары разделённых зарядов. После некоторой задержки подаётся последовательность двух СВЧ импульсов, которые формируют сигнал первичного электронного спинового эха. Регистрируется зависимость амплитуды сигнала эха в зависимости от интервала времени между двумя СВЧ импульсами. В наших экспериментах СВЧ импульсы возбуждают преимущественно спины электронов P^+_{700}.

при криогенных температурах замороженного водно-глицеринового раствора [8, 9]. Количественный анализ поляризации электронных спинов разделённых зарядов в РЦ позволяет находить расстояние между спинами, так как формирование неравновесной спиновой поляризации в этой ситуации связан с диполь-дипольным взаимодействием спинов [4, 5].

Однако прямым методом измерения диполь-дипольного взаимодействия является модуляция спада сигнала спинового эха, вызванная этим взаимодействием. Поэтому в нашей работе для измерения расстояния в радикальной паре был использован метод модуляции огибающей спада сигнала эха. Измерения были выполнены для трегалозных матриц для влажности 11% при различных температурах.

На рис. 3 представлены экспериментальные данные температурной зависимости модуляции огибающей спада сигнала для фотосистемы 1 в трегалозной матрице при 11% влажности.

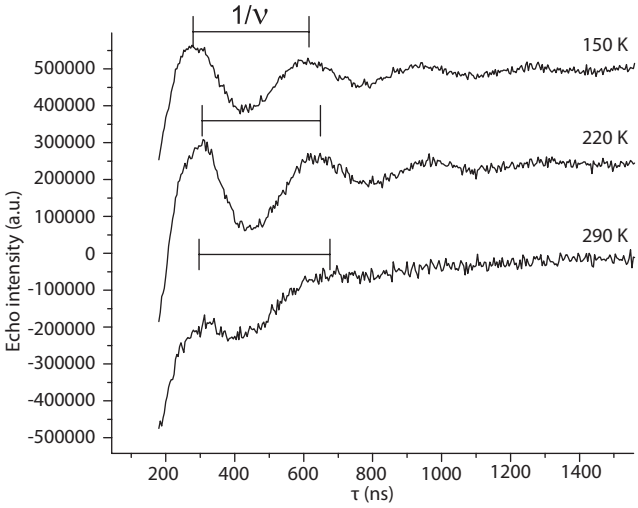


Рис. 3. Модуляция огибающей спада сигнала первичного спинового эха при различных температурах.

Таблица 1.

Температура (K)	Расстояние $R_{P\text{-}A}$ (A)
290	26.9 ± 0.1
220	26.18 ± 0.06
150	25.94 ± 0.06

Фурье образы полученных данных модуляции огибающей спада сигнала эха приведены на рис. 4. Из этих данных следует, что при увеличении температуры частота модуляции уменьшается.

Предположим, что наблюдаемая в эксперименте частота модуляции спада сигнала эха определяется только диполь-дипольным взаимодействием спинов разделённых зарядов в РЦ. Приравнивая $\Omega = (g_1 g_2 \beta^2/r^3)/\hbar = 2\pi\nu_{exp}$, наблюдаемым в эксперименте частотам модуляции можно поставить в соответствие расстояние r между спинами, для которого дипольная частота была бы равна наблюдаемой частоте модуляции спада сигнала эха. Результаты приведены в таблице 1.

Можно представить себе две причины уменьшения частоты модуляции спада сигнала первичного спинового эха при повышении температуры. Одна причина – увеличение расстояния между разделёнными зарядами P^+ и A_1^- при нагреве. Тогда мы должны были бы принять, что при нагревании от 150 K до комнатной температуры это расстояние увеличивается на 0.07 нм = 0.7 ангстрема. Это в принципе возможно, но это значительное увеличение расстояния между атомами в супрамолекуле, каковой является реакционный центр фотосинтетической системы. Мы считаем, что термическое расширение вносит в данном случае меньший вклад, так как уменьшение частоты модуляции может вполне объясняться случайной модуляцией диполь-дипольного взаимодействия между спинами случайными переворотами спинов в ходе спин-решёточной релаксации. В спин-решёточную релаксацию A_1^- может вносить заметный вклад железо в железосернистых кластерах реакционного центра. В свою очередь известно, что время спин-решёточной релаксации ионов железа в комплексных соединениях зависит от температуры, уменьшается с ростом температуры. Проведённые нами оценки вклада этого эффекта в частоту модуляции спада сигнала первичного спинового эха подтверждают, что в наших экспериментах может проявляться влияние случайных переворотов спинов A_1^- в наблюдаемую частоту модуляции спада сигнала эха. Как уже отмечалось во введении, этот эффект имеет такую же физическую природу как уменьшение частоты колебаний маятника в вязкой среде. Как хорошо известно, частота колебаний уменьшается с ростом вязкости. В нашем случае роль вязкости играет спин-решёточная парамагнитная релаксация, а повышение вязкости соответствует росту скорости случайных переворотов спинов в ходе спин-решёточной парамагнитной релаксации.

Во введении было отмечено, частоты модуляции спада сигнала эха не зависят от характера возбуждения спинов пары СВЧ импульсами. Но характер возбуждения влияет на глубину модуляции. Спектры ЭПР разделённых зарядов перекрываются не сильно, поэтому вероятность переворота спина A_1^- СВЧ π-импульсом, формирующим сигнал эха спина P^+, должен быть существенно меньше 1. С помощью уравнения (4) мы вычислили модуляцию огибающей спада сигнала эха с одной и тоже частотой диполь-дипольного взаимодействия (Ω, уравнение (3)), но при различных значения спин-решёточной релаксации. Ниже приведено качественное сравнение экспериментальных и численно-рассчитанных данных для модуляции огибающей спада сигнала эха (рис. 5). Расчёт был выполнен для Ω = 3 МГц для T_1 = 0.8 мкс и T_1 = 2.8 мкс.

Из рис. 5 видно, что случайная модуляция диполь-дипольного взаимодействия спин-решёточной релаксацией

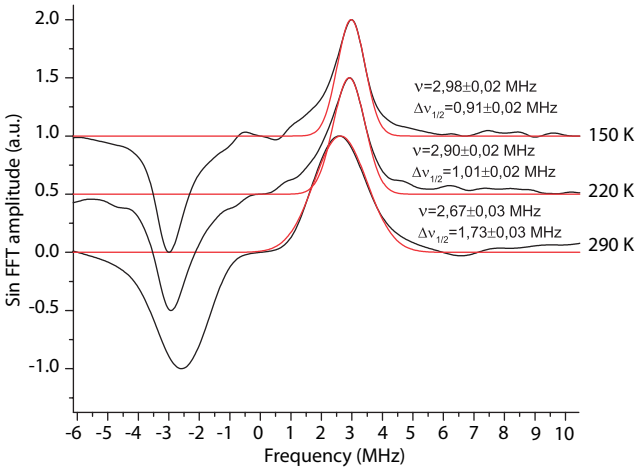


Рис. 4. Фурье-образ сигналов модуляции огибающей спада сигнала эха для трегалозной матрицы при влажности 11% при разных температурах.

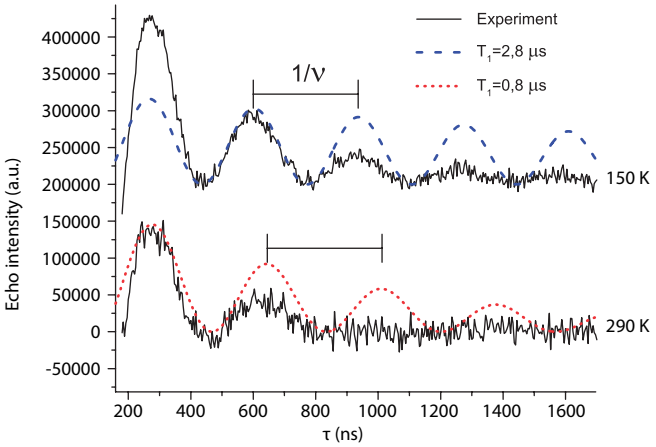


Рис. 5. Сравнение сигналов модуляции огибающей спада сигнала эха в двухимпульсной последовательности при различных температурах и рассчитанных при различных значения времени спин-решёточной релаксации (T_1).

может объяснить наблюдаемое на опыте уменьшение частоты модуляции спада сигнала эха при повышении температуры. Отметим, что частота W переворотов спина в ходе спин-решёточной релаксации связана с временем спин-решёточной релаксации T_1 соотношением $1/T_1 = 2W$.

Заключение

Главное наблюдение в этой работе – уменьшение частоты модуляции спада сигнала первичного спинового эха кофактора P^+_{700} в РЦ ФС1 в трегалозной матрице при повышении температуры от 150 К до комнатной температуры. Мы склоняемся к тому, что этот факт не даёт оснований делать вывод, что при нагревании увеличивается расстояние между P^+_{700} и A^-_1 спинами. Этот факт может быть вполне приписан влиянию спин-решёточной релаксации спина A^-_1 . Наши расчёты показывают, что для этого требуется уменьшение времени спин-решёточной релаксации от 3 мкс до 1 мкс. Это представляется вполне возможным. Но надо будет это проверить прямыми измерениями T_1 в будущем. В данном случае это нетривиальная задача, так как спины разделённых зарядов в РЦ ФС 1 являются гиперполяризованными, причём в одних частях спектра ЭПР спины поляризованы положительно, в других отрицательно. Поэтому, например, в методике измерения T_1 инверсия-восстановления, кинетика восстановления определяется прежде всего процессами кросс-релаксации, что сильно затрудняет определение времени спин-решёточной релаксации. Мы надеемся решить эту проблему в будущей работе.

При определении расстояния между кофакторами P^+ и A^- в реакционном центре возникает вопрос, насколько оправдано считать, что диполь-дипольное взаимодействие между спинами можно описывать в приближении точечных зарядов. В реальных системах спиновая плотность может быть делокализована. Может возникнуть вопрос, нельзя ли изменения в таблице 1 связать с делокализацией электронной спиновой плотности. Однако, это маловероятно, так как делокализация электронной спиновой плотности определяется сильными внутримолекулярными взаимодействиями электронов, и поэтому нагревание на 150 градусов не должно как-то заметно изменить характер делокализации электронной спиновой плотности. Поэтому мы считаем, что наблюдаемое в эксперименте изменение частоты модуляции спада сигнала электронного спинового эха не связано с делокализацией спиновой плотности в P^+_{700} и A^-_1 кофакторах реакционного центра.

Насколько нам известно, нами впервые наблюдён эффект сдвига частоты модуляции спада сигналов спинового эха, вызванной диполь-дипольным взаимодействием между спинами, за счёт влияния на спиновую динамику спин-решёточной релаксации. Замедление частоты динамического движения, обусловленного влиянием спин-решёточной релаксации на проявление в эксперименте диполь-дипольного взаимодействия между спинами, можно рассматривать как проявление квантового эффекта Зенона в динамике спинов в условиях взаимодействия спинов с решёткой.

Эта работа была выполнена нами в сотрудничестве с нашими коллегами М. Д. Мамедовым и А. Ю. Семеновым из МГУ (Москва) и К. Мебиусом из Свободного университета (Берлин).

Эта работа была поддержана грантом РФФИ и Правительства Республики Татарстан (проект 15-43-02538).

Литература

1. Palazzo G., Mallardi A., Hochkoeppler A., Cordone L., Venturoli G.: Biophys. J. **82**, 558 (2003)
2. Malferrari M., Savitsky A., Mamedov M.D., Milanovsky G.E., Lubitz W., Möbius K., Semenov A.Y., Venturoli G.: Biochim. Biophys. Acta – Bioenerg. **1857**, 1440 (2016)
3. Francia F., Palazzo G., Mallardi A., Cordone L., Venturoli G.: Biophys. J. **85**, 2760 (2003)
4. Zhidomirov G., Salikhov K.: Zhur. Experim. Teoret. Fiz. **56**, 1933 (1969)
5. Salikhov K.M., Dzuba S.A., Raitsimring A.M.: J. Magn. Reson. **42**, 255 (1981)
6. Salikhov K.M., Khairuzhdinov I.T., Zaripov R.B.: Appl. Magn. Reson. **45**, 573 (2014)
7. Shen G., Zhao J., Reimer S.K., Antonkine M.L., Cai Q., Weiland S.M., Golbeck J.H., Bryant D.A.: J. Biol. Chem. **277**, 20343 (2002)
8. Angerhofer A., Bittl R.: Photochem. Photobiol. **63**, 11 (1996)
9. Stehlik D., Möbius K.: Annu. Rev. Phys. Chem. **48**, 745–784 (1997)

Фотофизические свойства мономерных и димерных медных комплексов копропорфиринов

Ю. Е. Кандрашкин, А. А. Суханов, В. К. Воронкова

Отдел химической физики, лаборатория спиновой физики и спиновой химии

Представлены результаты исследования методами ЭПР и ВР ЭПР медных комплексов копропорфирина I (CuCPP-1) в разных растворителях до и после фотовозбуждения. Из анализа спектров ЭПР комплексов CuCPP-1 показано, что в о-терфениле присутствуют только мономерные фрагменты, а в смеси растворов хлороформа и изопропанола проявляется эффект димеризации, причём димерных фрагментов в пять раз больше чем мономерных. Определены параметры, описывающие спектры ЭПР мономерных и димерных фрагментов. Установлено, что тензор тонкой структуры димерного комплекса повёрнут относительно $\{g\}$-тензора димера, который совпадает с $\{g\}$-тензором мономерного комплекса. Спектры ВР ЭПР мономерных и димерных комплексов CuCPP-1 после фотовозбуждения наблюдаются главным образом от спин-поляризованных основных состояний мономера и димера, соответственно. Спектр ВР ЭПР мономера наблюдается в виде эмиссии. Основной вклад в спектр димера даёт интегральная поляризация электронных спинов, которая проявляется в виде сигнала поглощения. Кроме того, имеется небольшой вклад от мультиплетной поляризации основного состояния, который быстро спадает во времени. Временная зависимость спектра ВР ЭПР димера описана с учётом изменений этих вкладов во времени. Обсуждаются возможные причины различия знака поляризации основных состояний мономера и димера.

Введение

Порфирины и их производные обладают рядом уникальных свойств, связанных в первую очередь со способностью к окислительно-восстановительным реакциям, а также благодаря высокой эффективности поглощения света. Свойства порфиринов меняются в широком диапазоне зависимости от строения порфирина, среды, температуры и т.д. Благодаря этим свойствам порфирины и их производные лежат в основе энергетики живых организмов. Поэтому исследование этих молекул важно для поиска методов эффективного преобразования солнечной энергии.

Получение фундаментальных знаний о характере фотоиндуцированных состояний, спин-зависимых процессах, выявление новых явлений в фотовозбуждённых соединениях на основе металлопорфиринов является актуальной задачей для поиска новых функциональных материалов с управляемыми свойствами для применения в спинтронике, солнечной энергетике, биологии, практической медицине. Важным аспектом проблемы является изучение влияния спин-спинового взаимодействия между магнитными ионами в системах, построенных из нескольких металлопорфиринов, на фотоиндуцированные состояния и спин-зависящие процессы. Ранее нами были изучены фотоиндуцированные состояния димера, построенного из двух медьпорфириновых комплексов с аза-краун лигандами [1]. Это, насколько нам известно, единственный пример изучения димера фотовозбуждённых состояний металлопорфиринов с парамагнитными ионами методами ВР ЭПР спектроскопии. В данном работе мы представляем результаты исследования медных комплексов копропорфиринов I (CuCPP-1), обнаруживающих при определённых условиях способность к агрегированию.

Результаты и обсуждение

Экспериментальные доказательства димеризации медных комплексов копропорфиринов I (CuCPP-1)

Исследованы свойства новых металлопорфиринов, которые проявляют склонность к димеризации. Молекулярная структура медного комплекса копропорфирина I (CuCPP-1) представлена на рис. 1.

Эффект димеризации CuCPP-1 надёжно детектируется методом ЭПР по изменению формы спектра. Зависимость ЭПР спектра от растворителя представлена на рис. 2, где хорошо видно, что форма спектра мономерного фрагмента меди и димерного фрагмента существенно отличаются. Установлено, что в растворе орто-терфенила эффект димеризации не наблюдается, а в смеси растворов хлороформ(1)/изопрапанол(2) наблюдаются сигналы как

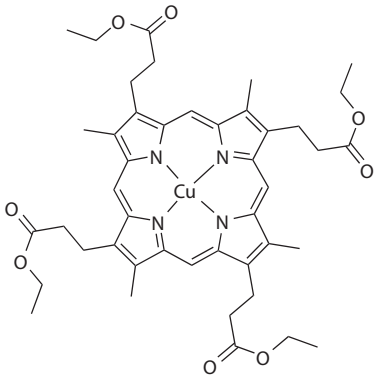


Рис. 1. Молекулярная структура CuCPP-1.

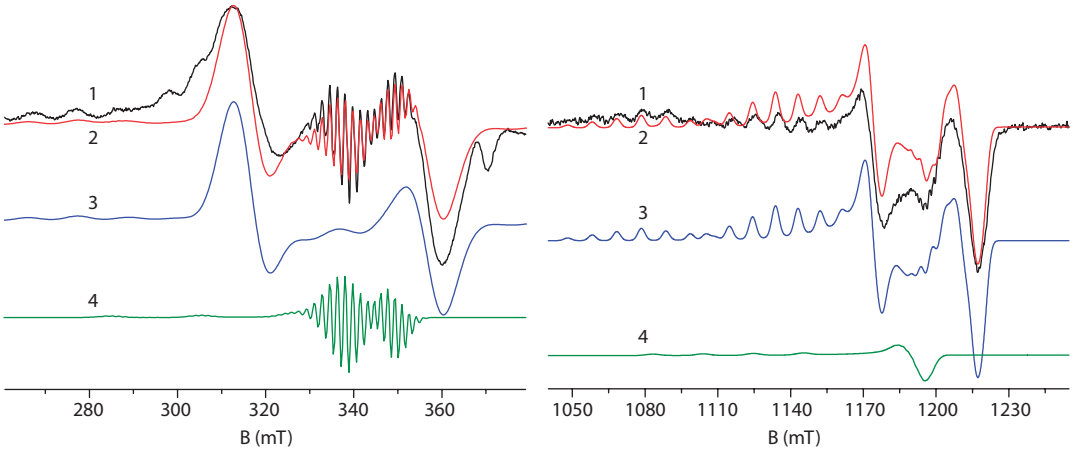


Рис. 2. Стационарные спектры ЭПР (до фотовозбуждения) CuCPP-1 в смеси хлороформа и изопропанола при 80 K в X- (слева) и Q-диапазонах (справа). Экспериментальные спектры представлены линиями 1. Модельные спектры димера и мономера представлены линиями 3 и 4, соответственно. Линии 2 – сумма вычисленных спектров мономера и димера, взятых в соотношении 1:5.

от мономеров, так и от димерных комплексов. Причём димерных комплексов приблизительно в пять раз больше, чем мономерных. Экспериментальные спектры были согласованы с теоретическими, рассчитанными с использованием программы EasySpin [2]. Для расчёта спектра мономера использовался гамильтониан, учитывающий зеемановсое взаимодействие, сверхтонкое взаимодействие с ядром иона меди и суперсверхтонкое взаимодействие с ядрами ближайших атомов азота:

$$\mathscr{H}_{\mathrm{M}} = \mu_{\mathrm{B}}\mathbf{B}\mathbf{g}S_1 + S_1\mathbf{A}_{\mathrm{Cu}}I_{\mathrm{Cu}} + \sum_{i=1}^{4} S_1\mathbf{A}_{\mathrm{Cu}}I_{N,i}\ .$$

Для расчёта спектра димера были добавлены члены, описывающие изотропное JS_1S_2 и анизотропное спин-спиновое взаимодействие $S_1\{D\}S_2$. Величина изотропного обменного взаимодействия была оценена из температурной зависимости спектров ЭПР как 1–10 см$^{-1}$. Из моделирования спектров в X- и Q-диапазонах установлено, что главные оси $\{D\}$- и $\{g\}$-тензоров не совпадают, и угол разворота равен 24°. При этом главные оси g-тензоров двух молекул в димере параллельны. Эти данные позволили сделать предположение о структуре димера: две молекулы параллельны, но сдвинуты относительно друг друга. ЭПР данные, полученные в отсутствие оптической накачки, были использованы при анализе фотоиндуцированных состояний этих систем.

Особенности фотоиндуцированных состояний CuCPP-1

Установив эффект димеризации в смеси растворов хлороформ/изопрапанол и наличие только мономерных комплексов в растворе орто-терфенила, мы получили возможность сравнить фотоиндуцированные свойства мономерных и димерных комплексов и проследить влияние спин-спинового взаимодействия между ионами меди на поляризацию электронных спинов. Для детектирования короткоживущих спин-поляризованных состояний, образующихся при фотовозбуждении комплексов, использовался метод времяразрешённого ЭПР. Забегая вперёд можно сказать, что спектры ВР ЭПР как мономера, так и димера регистрировались преимущественно от основного состояния комплексов. Для мономера это состояние с S = 1/2, для димера с S = 1.

Таким образом, экспериментально наблюдена неравновесная поляризация электронных спинов (ПЭС) основных состояний как мономера, так и димера. Экспериментальные данные показывают, что в мономерах и димерах реализуются различные механизмы формирования ПЭС. Для мономера (рис. 3) наблюдается сигнал ВР ЭПР в виде эмиссии. На рис. 3 показано сравнение ВР ЭПР спектра со спектром ЭПР в отсутствие фотовозбуждения. Так как в стационарном методе ЭПР детектируется производная спектра поглощения, то последний спектр был проинтегрирован по времени и перевернут. Из рис. 3 видно, что полученные разными методами спектры практически совпадают, за исключением небольшого различия в сильных полях. Это различие, возможно, указывает на наличие вклада от возбуждённого квартетного состояния. Действительно, хорошо известно, что при фотовозбуждении молекулы порфирина, формируется триплетное состояние, заселённость которого сильно отличается от равновесной заселённости. В присутствии парамагнитного иона, в частности иона меди, возникает сильное обменное взаимодействие между неспаренными d-электроном иона меди и π-электронами. Благодаря спин-спиновым взаимодействиям между этими тремя электронами происходит формирование новых возбуждённых состояний, нижними из которых являются дублет и квартет. Все эти состояния, включая основное состояние, являются магнитными, и, следовательно, могут давать вклад в сигнал ВР ЭПР [1, 3]. Обычно время жизни возбуждённых состояний очень короткое, что затрудняет

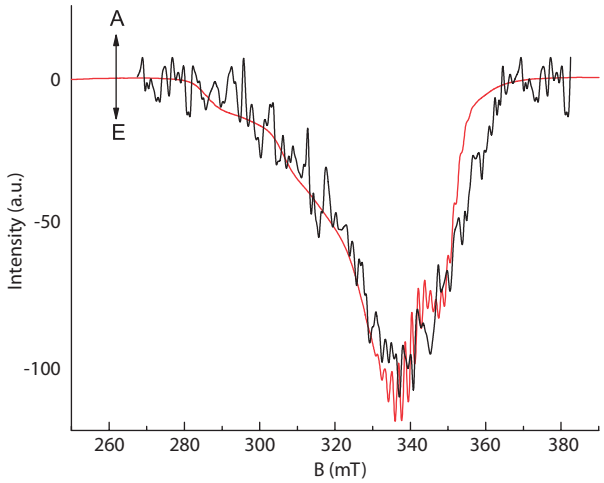


Рис. 3. Спектры ЭПР CuCPP-1 в орто-терфениле при 40 K (мономерный фрагмент): времяразрешённый ЭПР спектр (чёрная линия), проинтегрированный в интервале 1–100 мкс после лазерного импульса, и спектр ЭПР до фотовозбуждения, проинтегрированный и перевернутый (красная линия). Сравнение спектров показывает некоторое различие в высоких полях, которое, возможно, связано с сигналом от возбуждённого квартета.

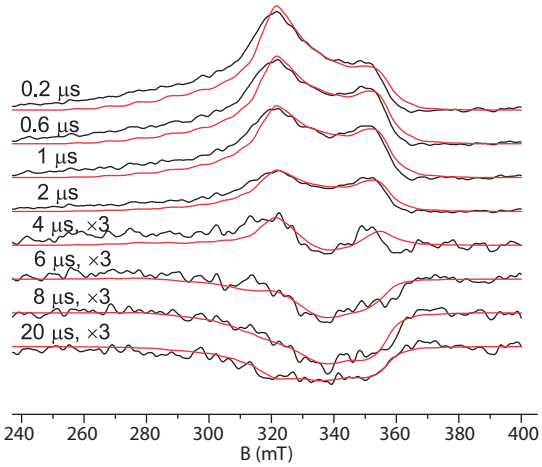


Рис. 4. Спектр ВР ЭПР в X-диапазоне (чёрная линия) CuCPP-1 в полярном растворителе при 40 K и теоретические спектры (красные линии), рассчитанные как суммы интегральной и мультиплетной ПЭС основного состояния димера с разными весовыми вкладами в зависимости от времени наблюдения. При моделировании также учитывался вклад от основного состояния мономеров, примесь которых присутствует в данном растворе.

их прямое детектирование методами ВР ЭПР. Однако, в работах [1, 3] было зарегистрировано возбуждённое квартетное состояние высокополевая часть которой находится как раз в области наблюдения различия между стационарным и ВР ЭПР спектрами на рис. 3. Поэтому мы предполагаем, что это различие может быть связано с вкладом от возбуждённого квартетного состояния.

Эволюция ВР ЭПР замороженного раствора CuCPP-1 в полярном растворителе, где образуются димеры, при фотовозбуждении проявляет сильную зависимость от времени наблюдения (рис. 4). На временах до 4 мкс наблюдается спектр в виде поглощения, причём соотношение интенсивностей двух сигналов изменяется во времени. Два хорошо разрешённых сигнала могут быть отнесены к спектру от спин-поляризованного основного состояния димера. Изменение соотношения интенсивностей этих линий указывает на наличие нескольких вкладов в спектр ЭПР на данном временном интервале. Показано, что эволюция спектра на этих временах хорошо описывается изменением соотношения вкладов от интегральной и мультиплетной поляризации. Результаты численного моделирования с учётом соответствующих матриц плотности и сравнения с экспериментальными данными показывают, что спектры ЭПР могут быть описаны как вклады от интегральной и мультиплетной поляризации основного состояния димера с дополнительным вкладом от спин-поляризованного основного состояния мономеров. Экспериментально наблюдаемая динамика спектров хорошо описывается модельными спектрами при изменении весовых вкладов от разных источников поляризации. При этом основной вклад практически на всех временах даёт интегральная поляризация основного состояния димера. Следует отметить, что знак интегральной поляризации димера и мономера различаются: для димера интегральная поляризация наблюдается в виде поглощения, а в мономере в виде эмиссии. Также экспериментально установлено, что при переходе от мономера к димеру, интенсивность интегральной ПЭС увеличивается.

Влияние спин-спиновых взаимодействий на формирование ПЭС

Механизм формирования ПЭС при фотовозбуждении молекул хорошо изучен [4]. Предложен ряд механизмов для случая взаимодействия фотовозбуждённого состояния порфирина с парамагнитными центрами, например, с присоединёнными радикалами [5–14], но не рассматривалась ситуация фотовозбуждения системы из двух взаимодействующих комплексов медь-порфирина. Мы рассмотрели возможные пути развития спиновой поляризации для такой системы и влияние спинового обмена на этот процесс.

В мономере порфирина, в отсутствие парамагнитного иона поглощение света ведёт к переходу π-электрона порфиринового кольца в первое возбуждённое синглетное состояние. В дальнейшем, за счёт внутримолекулярного интеркомбинационного S-T перехода (ИКП) происходит спин-селективное заселение состояний триплета. Переход S-T становится частично разрешённым за счёт спин-орбитальной связи, которая смешивает синглетное и триплетное состояния возбуждённого порфирина. В случае порфиринов с парамагнитными ионами ИКП идут по другому механизму. Основное состояние в медь-порфириновых комплексах является парамагнитным (S = 1/2), благодаря наличию неспаренного d-электрона меди. Взаимодействие неспаренных π-электронов порфирино-

вого кольца и d-электрона иона меди приводит к образованию новых спиновых состояний: триплет-дублетное состояние T_2 с $S = 1/2$ и триплет-квартетное состояние T_4 с $S = 3/2$ [15, 16]. Различие величин обменного взаимодействия между d-электроном и двумя неспаренными π-электронами смешивает триплет-дублетное состояние T_2 с возбуждённым синглетом и основным дублетным состоянием. В результате переходы между этими состояниями становятся частично спин-разрешёнными, что существенно увеличивает скорость ИКП между этими состояниями по сравнению со скоростью ИКП за счёт спин-орбитальной связи, которая смешивает синглетное и триплетное состояния возбуждённого порфирина в отсутствие парамагнитного иона. В результате, ожидается два основных источника ПЭС для фотовозбуждённых медь-порфиринов: ИКП с триплет-дублета на триплет-квартет ($T_2 \rightarrow T_4$) [5–10] и спин-селективная релаксация с триплет-квартета [11–14].

В случае димера вероятность поглощения кванта света одновременно двумя фрагментами димера мала, поэтому для анализа предполагалось, что происходит фотовозбуждение только одного комплекса димера, но что дальнейшие процессы происходят с учётом влияния соседней молекулы димера. В димере медь-порфирина состояния T_2 и T_4 одного фрагмента расщепляются благодаря взаимодействию с *d*-электроном иона меди другого фрагмента, образуя новые состояния, которые включают одно синглетное, два триплетных и одно квинтетное состояния. Все эти возбуждённые состояния за исключением квинтета, смешиваются за счёт члена обменного взаимодействия, несимметричного относительно перестановки электрона ($J(d_1, \pi) - J(d_1, \pi^*)$, $J(d_2, \pi) - J(d_2, \pi^*)$). Квинтетное состояние симметрично относительно перестановки электронов и, поэтому, изотропное обменное взаимодействие не влияет на ИКП между квинтетом и остальными состояниями. Это состояние должно иметь более длинное время жизни при условии, что оно находится ниже по энергии по сравнению с другими возбуждёнными состояниями. В этому случае, положительный знак ПЭС димеров может отражать изменение доминирующего механизма поляризации, когда ПЭС происходит в процессе электронной релаксации из квинтета через более высоко-лежащий триплет. Сравнение интенсивности спин-поляризованного спектра при 40 и 80 K подтверждает эту гипотезу. Обычно повышение температуры уменьшает ПЭС, однако сигнал ВР ЭПР в димерах остаётся сравнимой по интенсивности, что может отражать ускорение электронной релаксации квинтета через более высоко-лежащее триплетное состояние.

Итак, различие знака ПЭС основных состояний мономерного и димерного фрагментов CuCCP-1 отражает изменение пути формирования ПЭС в этих системах: от формирования поляризации за счёт конкуренции переходов из состояния T_2 в состояние T_4 и основное состояние в случае мономера к электронной спиновой релаксации из квинтетного состояния в основное через более высоко-лежащие триплетные состояния в случае димера.

Заключение

Проанализированы возможные источники электронной спиновой поляризации в мономерном и димерном комплексах CuCCP-1 и возможное влияние спин-спинового взаимодействия между комплексами на ЭСП. Сделано предположение, что различие знаков ПЭС димера и мономера отражают изменение пути релаксации электронов в димере по сравнению с мономером за счёт участия d-электрона соседнего фрагмента и релаксации с квинтета на основное через более высокое лежащее триплетное состояние в димерах.

Образцы были приготовлены В. С. Тюрином (Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физической химии и электрохимии им. А. Н. Фрумкина Российской академии наук).

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ №16-03-00586.

Литература

1. Kandrashkin Yu.E., Iyudin V.S., Voronkova V.K., Mikhalitsyna E.A., Tyurin V.S.: Appl. Magn. Reson. **44**, 967–981 (2013)
2. Stoll S., Schweiger A.: J. Magn. Reson. **178**, no. 1, 42–55 (2006)
3. Iyudin V.S., Kandrashkin Yu.E., Voronkova V.K., Tyurin V.S., Kirichenko E.N.: Appl. Magn. Reson. **40**, 75–89 (2011)
4. Salikhov K.M., Molin Yu.N., Sagdeev R.Z., Buchachenko A.L.: Spin Polarization and Magnetic Effects in Radical Reactions. Amsterdam: Elsevier 1984.
5. Corvaja C., Franco L., Pasimeni L., Toffoletti A., Montanari L.: Chem. Phys. Lett. **210**, 355 (1993)
6. Mazzoni M., Conti F., Corvaja C.: Appl. Magn. Reson. **18**(3), 351 (2000)
7. Moons H., Goovaerts E., Gubskaya V.P., Nuretdinov I.A., Corvaja C., Franco L.: Phys. Chem. Chem. Phys. **13**, no. 9, 3942–3951 (2011)
8. Ishii K., Fujisawa J., Adachi A., Yamauchi S., Kobayashi N.: J. Am. Chem. Soc. **120**, 3152 (1998)
9. Kandrashkin Yu.E., van der Est A.: Chem. Phys. Lett. **379**, no. 5, 574–580 (2003)
10. Kandrashkin Yu.E., van der Est A.: J. Chem. Phys. **120**, no. 10, 4790–4799 (2004)
11. Kandrashkin Yu.E., Asano M.S., van der Est A.: J. Phys. Chem. A **110**, no. 31, 9617–9626 (2006)
12. Kandrashkin Yu.E., Asano M.S., van der Est A.: J. Phys. Chem. A **110**, no. 31, 9607–9616 (2006)
13. Kandrashkin Yu.E., Asano M.S., van der Est A.: Phys. Chem. Chem. Phys. **8**, no. 18, 2129–2132 (2006)
14. Ito A., Hinoshita M., Kato K., Teki Y.: Chem. Lett. **45**, no. 11, 1324–1326 (2016)
15. Gouterman M., Mathies R.A., Smith B.E., Caughey W.S.: J. Chem. Phys. **52**, 3795–3802 (1970)
16. Gouterman M.: The pophyrins, in The Porphyrin Handbook, vol. 3, pp. 1–165 (Dolphin D., ed.). New York: Academic Press 1978.

Продукция оксида азота в тканях сердца и печени лабораторных крыс в ходе восстановления после 30-суточной гипокинезии: ЭПР исследование

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

Отдел химической физики, лаборатория спиновой физики и спиновой химии

Методом электронного парамагнитного резонанса анализировали продукцию оксида азота (NO) в тканях желудочков сердца и печени крыс, содержавшихся в условиях 30-суточной гипокинезии, а также в ходе последующего восстановления в течение 1 недели. Обнаружено, что режим гипокинезии приводит к увеличению продукции NO в исследованных тканях в 2-3 раза. Найдено, что в ходе последующего восстановления от гипокинезии наблюдается дальнейшее увеличение продукции NO в желудочках сердца, а в тканях печени продукция NO остаётся неизменным.

Введение

Ранее нами было проведено ЭПР исследование интенсивности продукции оксида азота (NO) при моделировании гипокинезии (ограничении двигательной активности) у крыс. Было найдено, что количество NO, образующегося в тканях сердца и печени увеличивается после нарастающей 30-, 60- и 90-суточной гипокинезии (ГК) в 2-3 раза [1, 2]. NO, являющийся свободным радикалом, рассматривается в настоящее время как новая сигнальная молекула, играющая роль универсального регулятора многих физиологических процессов в организме [3, 4]. На сегодняшний день значимым направлением физиологических исследований является изучение роли NO в деятельности сердечно-сосудистой, нервной и других системах организма [5–8]. Большой интерес привлекает участие NO в механизмах развития различных патологических состояний организма [4, 9]. Его функциональная роль прослеживается для центральной и периферической нервной системы, для сердечно-сосудистой системы, для системы кровоснабжения [3–5, 10]. Показано также, что система NO играет важную роль при адаптации организма к различным изменениям внешней среды и внешних условий, например, при значительных физических нагрузках интенсивность его продукции уменьшается [11, 12]. Можно предположить, что эффект зависит от количества образующегося NO, однако, не ясно, какие количества NO считать небольшими, а какие увеличенными при развитии различных патологических ситуаций [13–15].

Гипокинезия (ограничение ДА) является одной из важнейших медико-социальных проблем, вызванной образом жизни, профессиональной деятельностью, длительным постельным режимом и т.д. Ограничение мышечной деятельности является важнейшим составляющим симптомов гипокинетического синдрома. При ГК происходит уменьшение нагрузки на мышечный аппарат, что приводит к изменениям функциональных и морфологических свойств тканей вплоть до патологических состояний в зависимости от продолжительности и степени ГК [16, 17]. Развивается атрофия скелетных мышц с уменьшением мышечной силы. Отмечается перестройка нейрогуморальных регуляций вегетативно-висцеральных функций, особенно сердечно-сосудистой системы [16, 17]. Исходя из этого, целью исследования явилось изучение роли NO при ГК путём анализа продукции NO в различных тканях крыс, которые росли в условиях ГК. Эти исследования проводились коллективом, в котором участвовали также сотрудники КФУ проф. Т. Л. Зефиров, проф. Ф. Г. Ситдиков, Р. И. Зарипова, Н. И. Зиятдинова.

Материалы и методы исследования

Эксперименты проводили на белых беспородных крысятах. Животные были разделены на две группы (по 20 животных в каждой группе): I группа – контрольные животные (К), которые содержались в стандартных условиях вивария; II группа – животные, которые находились в условиях нарастающей ГК. Гипокинезию начинали с 21-дневного возраста: первые два дня время ГК составляло 1 час, а в дальнейшем увеличивалось на 2 часа через каждые 2 дня. К 25 дню ГК время пребывания животных в клетках-пеналах достигало 23 часов, и в дальнейшем оставалась постоянным до истечения 30 суток [1, 2].

Изучали содержание NO в тканях сердца и печени. Трудность определения содержания свободного NO в тканях организма заключается в коротком времени его жизни, что проявляется в его низкой концентрации в тканях. В последнее время одним из наиболее эффективных методов обнаружения и количественного определения NO в биологических тканях стал метод электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) [18, 19] с использованием методики спиновых ловушек, которая позволяет детектировать NO в малых концентрациях [20]. Нами в качестве спиновой ловушки был применен комплекс Fe^{2+} с диэтилдитиокарбаматом – (ДЭТК)2-Fe^{2+}. Комплекс спиновой ловушки с NO ((ДЭТК)2-Fe^{2+}-NO) в таком состоянии сохраняется, и сигнал от комплекса не изменяется в течение не менее

месяца [19–21]. Подробности эксперимента и методики описаны ранее [15, 22]. Масса образцов составляла 100 мг. Регистрация приготовленных образцов проводилась на спектрометре ЭПР ER 200E SRC X-диапазона фирмы Bruker. Амплитуда модуляции, усиление и мощность СВЧ были подобраны таким образом, чтобы избежать перемодуляции и насыщения сигнала ЭПР, и сохранялись одинаковыми на протяжении всех измерений.

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

Результаты исследования и их обсуждение

Регистрировали спектры ЭПР у крыс после ГК продолжительностью 30 суток, в качестве контроля тестировались интактные животные соответствующего возраста (50-суточные). Также регистрировали спектры ЭПР у крыс, которые в течение 1-й недели находились в условиях восстановления после 30-суточной ГК. Во всех измеренных спектрах ЭПР регистрировали характерный триплетный сигнал от комплекса на основе спиновой ловушки (ДЭТК)2-Fe^{2+}-NO [20], интегральная интенсивность которого прямо пропорциональна содержанию NO в образце.

На рис. 1 показаны спектры ЭПР, полученные от тканей левого желудочка сердца крыс, содержавшихся в условиях ГК в течение 30 суток, а также крыс, которые в течение 1-й недели находились в условиях восстановления после 30-суточной ГК. Измерения величины интегральной интенсивности спектров ЭПР спиновой ловушки (ДЭТК)2-Fe^{2+}-NO показывают, что продукция NO в тканях желудочков сердца равна в среднем 240 нмоль/(г · час), в тканях печени – 400 нмоль/(г · час) для контрольных крыс (продукция NO в единицу времени, нормированная на массу образца ткани). Найдено, что 30-суточная ГК приводит к увеличению содержания NO в 2 раза, как в тканях левого желудочка сердца крыс, так и печени (рис. 2). При восстановлении после 30-суточной ГК в тканях печени не происходит дальнейшего изменения продукции NO по сравнению с группой 30-суточной ГК, однако в тканях левого желудочка отмечается дальнейшее увеличение продукции NO примерно в 2 раза (рис. 2а). При восстановлении после 30-суточной ГК не происходит изменения продукции NO по сравнению с группой 30-суточной ГК в тканях селезенки (рис. 2б). Поскольку в организме возможны разные источники. то ранее нами были проведены эксперименты с целью определения источников повышения продукции NO при ГК. Для решения этих задач был использован неспецифический

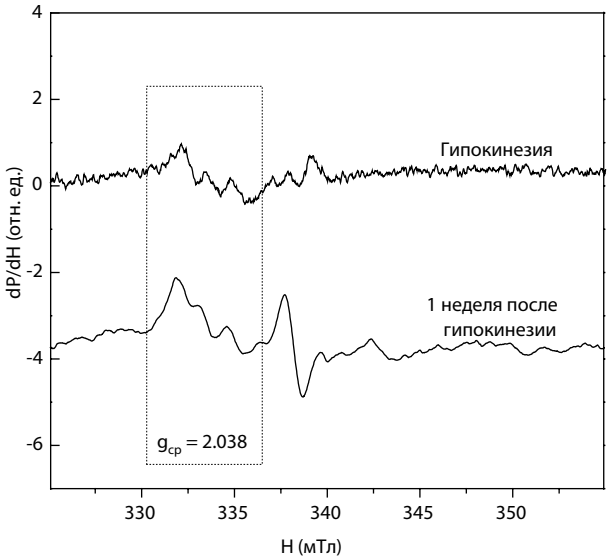


Рис. 1. Спектры ЭПР тканей желудочков сердца интактной крысы и крыс через 30 дней гипокинезии и 1 неделю восстановления после 30-суточной гипокинезии. Пунктиром показан вклад NO в наблюдаемом сигнале. Крысам был введён комплекс (DETC)2-Fe^{2+}-цитрат. $g_{ср} = 2.038$.

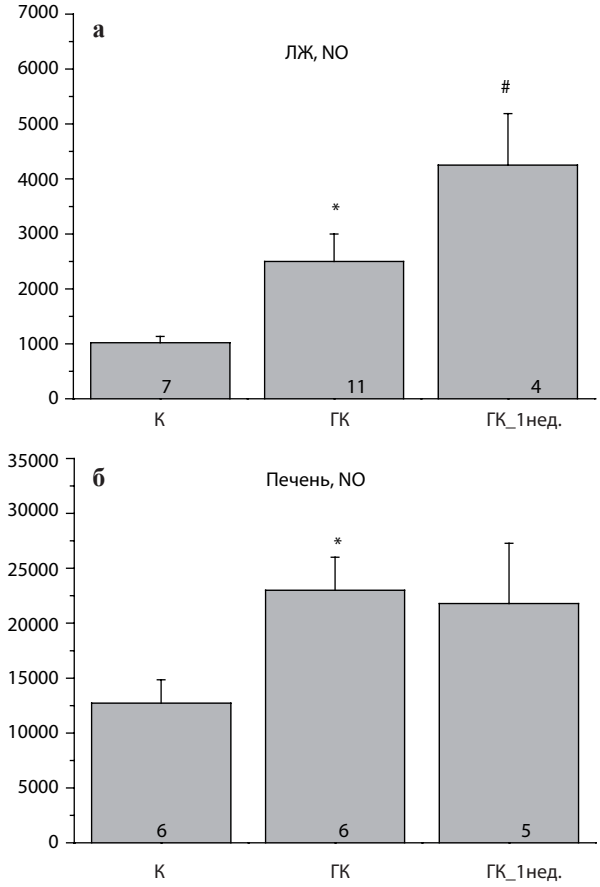


Рис. 2. а Относительное содержание NO в тканях левого желудочка сердца. **б** Относительное содержание NO в тканях печени. К – интактные, ГК – 30 дней гипокинезии, ГК_1нед. – 1 неделя восстановления после 30-суточной гипокинезии. Ось ординат – средняя интегральная интенсивность сигнала (DETC)2-Fe^{2+}-NO. * – достоверное отличие ($p < 0.05$) от контроля, # – достоверное отличие ($p < 0.05$) от уровня ГК $p < 0.05$.

блокатор NO-синтаз-L-NAME. Было найдено, что применение L-NAME у крыс как после 30-суточной ГК [24], так и после 60-суточной ГК [22] приводила к снижению содержания NO до уровня, значительно ниже значения у контрольных животных. Эти результаты показывают, что в повышение интенсивности образования NO при ГК основной вклад вносит ферментативный путь синтеза NO.

Поскольку наибольшее образование NO в тканях предсердий и желудочков, а также в тканях печени было нами ранее обнаружено после 30-суточной гипокинезии [1, 22], то мы в качестве основной задачи данного исследования выбрали анализ продукции NO после восстановления животных именно после этой ГК. Мы получили результат, который отличался от возможных предположений – оказалось, что продукция NO начинает при этом увеличиваться в сердце и не изменяется в тканях печени. Этот результат свидетельствует, что восстановление после ГК является для животных также большим иммобилизационным стрессом.

Авторы благодарят сотрудников Казанского федерального университета: сотрудники КФУ проф. Т. Л. Зефирова, проф. Ф. Г. Ситдикова, Р. И Зарипову, Н. И. Зиятдинову за проведённые эксперименты по формированию гипокинезии.

Работа выполнена при поддержке Программы Президиума РАН № 1.26П.

Литература

1. Гайнутдинов Х.Л., Файзуллина Р.И., Андрианов В.В., Гильмутдинова Р.И., Июдин В.С., Яфарова Г.Г., Ситдиков Ф.Г.: Бюлл. экспер. биол. мед. **150**, № 11, 590–592 (2012)
2. Яфарова Г.Г., Андрианов В.В., Июдин В.С., Гайнутдинов Х.Л.: Казанский физико-технический институт им. Е. К. Завойского 2012. Ежегодник. Казань: КФТИ КазНЦ РАН 2013. с. 56–59.
3. Ванин А.Ф.: Соросовский образовательный журн. № 11, 7–12 (2001)
4. Pacher P., Beckman J.S., Liaudet L.: Physiol. Rev. **87**, 315–427 (2007)
5. Реутов В.П., Охотин В.Е., Шуклин А.В., Сорокина Е.Г., Косицын Н.С., Гурин В.Н.: Успехи физиол. наук **38**, № 4, 39–58 (2007)
6. Андрианов В.В., Ситдиков Ф.Г., Гайнутдинов Х.Л., Юртаева С.В., Обыночный А.А., Яфарова Г.Г., Муранова Л.Н., Каримов Ф.К., Чиглинцев В.М., Июдин В.С.: Онтогенез **39**, № 6, 437–442 (2008)
7. Timoshin A.A., Pisarenko O.I., Tskitishvili O.V., Serebriakova L.I., Studneva I.M., Drobotova D.Iu., Ruuge E.K., Vanin A.F.: Biofizika **55**, No. 6, 1099–107 (2010)
8. Steinert J.R., Chernova T., Forsythe I.D.: Neuroscientist **16**, 435–452 (2010)
9. Gainutdinov Kh.L., Gavrilova S.A., Iyudin V.S., Golubeva A.V., Davydova M.P., Jafarova G.G., Andrianov V.V., Koshelev V.B.: Appl. Magn. Reson. **40**, No. 3, 267–278 (2011)
10. Hwang T.L., Yeh C.C.: Hepatogastroenterology **50**, 188–191 (2003)
11. Манухина Е.Б., Малышев И.Ю.: Российский физиол. журнал им. И.М. Сеченова **86**, 1283–1292 (2000)
12. Manukhina E.B., Downey H.F., Mallet R.T.: Experim. Biol. Med. **231**, 343–365 (2006)
13. Calabrese V., Cornelius C., Rizzarelli E., Owen J.B., Dinkova-Kostova A.T., Butterfield D.A.: Antioxidants and Redox Signaling. **11**, No. 11, 2717–2739 (2009)
14. Gainutdinov Kh.L., Gavrilova S.A., Iyudin V.S., Golubeva A.V., Davydova M.P., Jafarova G.G., Andrianov V.V., Koshelev V.B.: Appl. Magn. Reson. **40**, No. 3, 267–278 (2011)
15. Андрианов В.В., Яфарова Г.Г., Июдин В.С., Гайнутдинов Х.Л.: Казанский физико-технический институт им. Е. К. Завойского 2014. Ежегодник. Казань: КФТИ КазНЦ РАН 2015. с. 45–48.
16. Козловская И.Б., Киренская А.В.: Рос. физиол. журн. **89**, № 3, 247–258 (2003)
17. Чинкин А.С.: Успехи физиологических наук **43**, № 2, 72–82 (2012)
18. Khramtsov V.V., Volodarsky L.B.: Biol. Magnet. Reson. **14**, 109–180 (1998)
19. Vanin A.F., Huisman A., Van Faassen E.E.: Methods in Enzymology **359**, 27–42 (2003)
20. Микоян В.Д., Кубрина Л.Н., Ванин А.Ф.: Биофизика **39**, 915–918 (1994)
21. Andrianov V.V., Pashkevich S.G., Yafarova G.G., Denisov A.A., Iyudin V.S., Bogodvid T.Kh., Dosina M.O., Kulchitsky V.A.,.Gainutdinov Kh.L.: Appl. Magn. Reson. **47**, No. 9, 965–976 (2016)
22. Гайнутдинов Х.Л., Андрианов В.В., Июдин В.С., Юртаева С.В., Яфарова Г.Г., Файзуллина Р.И., Ситдиков Ф.Г.: Биофизика **58**, вып. 2, 276–280 (2013)
23. Лакин Г.Ф.: Биометрия. М.: Высшая школа 1990. 113 с.
24. Зарипова Р.И., Гайнутдинов Х.Л., Зефиров Т.Л.: Бюлл. экспер. биол. мед. **157**, № 5, 554–556 (2014)

Димерная самоорганизация примесных ионов иттербия в монокристаллах синтетического форстерита

В. Ф. Тарасов, А. А. Суханов

Лаборатория радиоспектроскопии диэлектриков, лаборатория спиновой физики и спиновой химии

Методом стационарной и импульсной ЭПР-спектроскопии в X-диапазоне исследованы парамагнитные центры, образованные примесными ионами Yb^{3+} в синтетическом форстерите (Mg_2SiO_4), выращенном методом Чохральского. Эти центры представляют собой одиночные ионы, замещающие магний в двух различных кристаллографических позициях, обозначаемых M1 и M2, и димерные ассоциаты, образованные двумя ионами Yb^{3+} в близлежащих позициях M1. Установлено, что имеется ярко выраженный механизм, благоприятствующий самоорганизации ионов иттербия в димерные ассоциаты в процессе роста кристаллов, а механизм спин-спиновой связи между ионами иттербия в ассоциате имеет преимущественно диполь-дипольный характер, что позволяет управлять энергией спин-спинового взаимодействия изменением ориентации внешнего магнитного поля.

Введение

Оптические и магнитные свойства диэлектрических кристаллов в значительной степени определяются содержанием элементов переходных групп, которые всегда присутствуют в кристалле в виде неконтролируемой примеси, или вводятся специально, например, в качестве активных центров лазерной генерации. В последнее время большое внимание привлекают редкоземельные (РЗ) ионы в оксидных кристаллах, рассматриваемые в качестве перспективной материальной основы для устройств квантовой памяти [1–4]. Для квантовой информатики может представлять интерес совмещение процессов хранения и обработки квантовой информации. Это можно сделать, если в качестве элементов хранения квантовой информации использовать димерные ассоциаты РЗ ионов, связанных спин-спиновым взаимодействием. Для возможности практической реализации квантовых вычислений на электронных спинах электронные кубиты должны иметь большое время сохранения когерентного состояния и определённую величину энергии спин-спиновой связи. Для реализации большого времени сохранения когерентности в двух-кубитной системе необходимо минимизировать влияние соседних электронных спинов. Для этого в качестве двух связанных кубитов предлагается использовать димерные ассоциаты РЗ ионов, локализованных в сложных молекулярных системах [5]. Другая возможность – использование димерных ассоциатов примесных РЗ ионов в кристаллах, где высокая концентрация димеров является результатом димерной самоорганизации примесных ионов в процессе выращивания кристалла из расплава. Ранее такая самоорганизация была обнаружена нами для ионов гольмия и тербия в синтетическом форстерите Mg_2SiO_4 [6, 7].

Спин-спиновое взаимодействие между ионами димерного ассоциата может иметь обменную и/или диполь-дипольную природу. Диполь-дипольное взаимодействие существенно анизотропно. Величина и знак этого взаимодействия зависят от угла между направлением радиус-вектора, соединяющего ионы, и направлением магнитного момента электронной оболочки. В таком случае изменяя направление внешнего магнитного поля можно управлять энергией спин-спинового взаимодействия и установить величину этого взаимодействия, оптимальную для реализации квантовых логических операций. В данной работе сообщается о результатах исследования методом ЭПР структуры и магнитных свойств парамагнитных центров, образованных примесными ионами иттербия в монокристаллах синтетического форстерита. Показано, что для ионов иттербия наблюдается ярко выраженных эффект димерной самоорганизации, а величина энергии спин-спинового взаимодействия зависит от направления внешнего магнитного поля, при определённых ориентациях проходя через нулевое значение.

Результаты

Монокристалл Mg_2SiO_4:Yb^{3+} был выращен из расплава, содержащего 0.15 ат.% ионов Yb^{3+} методом Чохральского из иридиевого тигля диаметром и высотой 30 мм на монокристаллическую затравку, вырезанную вдоль кристаллографической оси *a* (здесь и далее кристаллографические оси указаны в установке Pbnm). Скорость вытягивания составляла 1 мм/ч, скорость вращения – 6 об./мин. Шихта для выращивания готовилась путём тщательного перемешивания необходимых количеств реактивов MgO, SiO_2 и Yb_2O_3 квалификации ОСЧ.

Измерения проводились на спектрометре ЭПР Elexsys E680 с диэлектрическим резонатором в X-диапазоне при температуре 10 К. Образец для ЭПР-исследований был вырезан из срединной части були в виде кубика размером 3×3×3 мм с гранями, ориентированными по кристаллографическим плоскостям. Ориентация кристаллографи-

ческих осей вырезанного образца определялась методом рентгеновской дифрактометрии. Погрешность ориентации составила не более ±2°. Концентрация иттербия в образце, определённая с помощью метода индуктивно связанной плазмы (ICP MS) и абсорбционной спектроскопии, составила $2.5 \cdot 10^{-4}$ ат.%.

Кристаллическая структура форстерита имеет ромбическую симметрию с пространственной группой Pbnm. В структуре форстерита имеются два кристаллографически различных типа кислородных октаэдров, внутри которых находятся ионы магния. Обычно эти позиции ионов Mg^{2+} обозначаются M1 и M2. В элементарной ячейке кристалла находятся по четыре иона Mg^{2+} в каждой из позиций. Конфигурация шести ближайших кислородных атомов вокруг позиции M1 представляет аксиально вытянутый октаэдр, в котором катион находится в центре симметрии. Кристаллическое поле в позиции M1 имеет триклинную симметрию с точечной группой симметрии C_i, и для произвольной ориентации магнитного поля имеются четыре магнитно-неэквивалентных позиции M1. В случае, когда магнитное поле ориентировано в плоскостях, перпендикулярных кристаллографическим осям, ионы, занимающие позиции M1, попарно магнитно-эквивалентны. Кислородное окружение Mg^{2+} в позиции M2 имеет зеркальную плоскость симметрии, перпендикулярную оси *c*, а кристаллическое поле имеет моноклинную симметрию с точечной группой симметрии C_s. Поэтому для произвольной ориентации магнитного поля относительно кристаллографических осей имеются два магнитно-неэквивалентных M2 центра, а в случае, когда магнитное поле лежит в плоскости *ac* или *bc*, все четыре центра становятся магнитно-эквивалентными. Данное обстоятельство позволяет по ориентационным зависимостям спектров ЭПР однозначно установить тип позиции, в которой находится примесный ион.

На рис. 1 приведена ориентационная зависимость спектров ЭПР форстерита, легированного иттербием, при вращении магнитного поля в плоскости (*bc*). Видно, что по своей ориентационной зависимости резонансные линии на спектрах делятся на группы. Для группы из двух линий, обозначенных как M2, экстремальные положения резонансных линий совпадают с направлениями кристаллографических осей. Поэтому можно сделать вывод, что эта группа линий принадлежит двум одиночным магнитно неэквивалентным ионам иттербия в позиции M2. Для двух групп линий, обозначенных как M1(1) и M1(2), ориентации магнитного поля, соответствующие экстремальным положениям линий на спектрах, отличаются от направлений кристаллографических осей. Поэтому эти группы линий принадлежат иттербию в кристаллографической позиции M1.

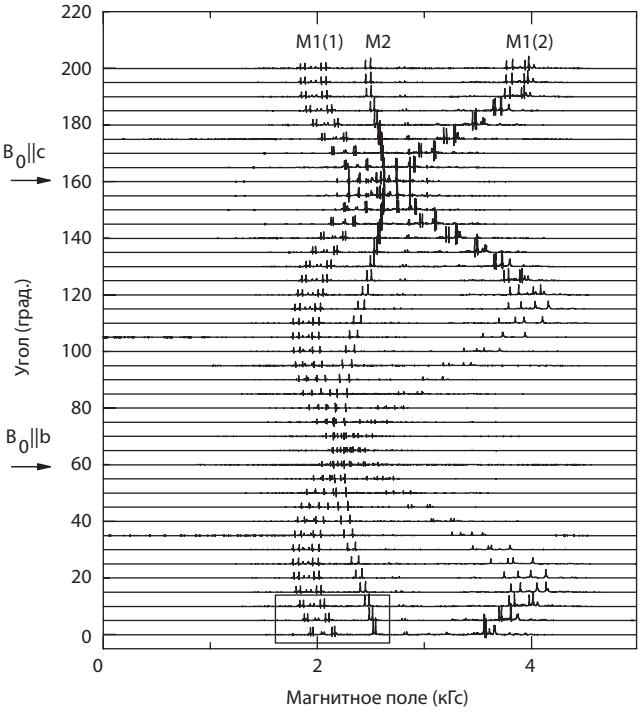


Рис. 1. Спектры ЭПР монокристалла синтетического форстерита, легированного иттербием, записанные при вращении магнитного поля вокруг кристаллографической оси *a*. Положение нулевой линии спектров соответствует ориентации магнитного поля, указанной на оси ординат. Рабочая частота спектрометра 9.723 ГГц.

Обсуждение

Для анализа структуры и магнитных свойств иона иттербия в позиции M1 необходимо более детально рассмотреть эти спектры. На рис. 2 в более крупном масштабе представлена часть спектров, выделенная на рис. 1 прямоугольником. Видно, что в группе линий M1(1) присутствуют три пары линий вместо одной. На рис. 1 видно, что ориентационные зависимости этих линий практически идентичны, т.е. все 6 линий принадлежат ионам иттербия в идентичной кристаллографической позиции. Наличие 6 линий можно объяснить, если предположить,

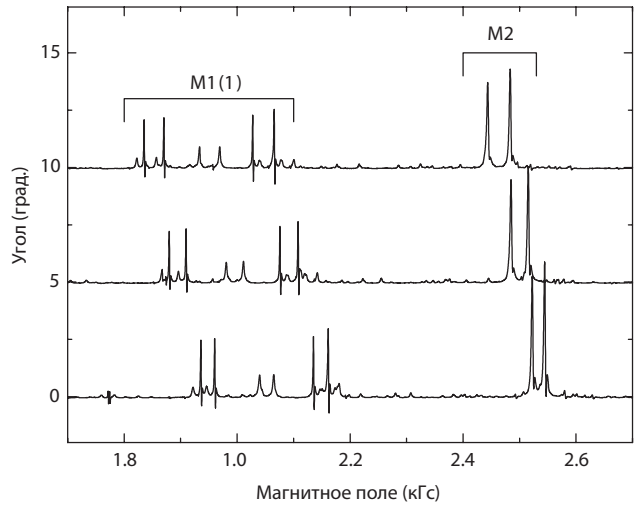


Рис. 2. Спектры ЭПР центров M1 и M2 иона иттербия в форстерите при различной ориентации магнитного поля в плоскости (*bc*).

что две центральные линии принадлежат двум магнитно-неэквивалентным центрам, образованным одиночными ионами иттербия, а крайние пары линий принадлежат димерным ассоциатам ионов иттербия. Расщепление между линиями димерных ассоциатов пропорционально энергии спин-спинового взаимодействия.

Для доказательства того, что крайние пары линий принадлежат димерным ассоциатам иттербия, были проведены измерения частоты нутаций Раби для одиночного иона и димерного ассоциата.

Для проведения этих измерений была выбрана часть спектра в диапазоне магнитных полей 140–160 мТл, записанного при показаниях лимба гониометра 190 градусов. При этой ориентации образца, приблизительно соответствующей минимальным значениям величины резонансного магнитного поля на спектрах, резонансные линии, принадлежащие различным парамагнитным центрам иттербия, легко идентифицируются. На рис. 3 показаны спектры ЭПР, записанные при указанных выше условиях в двух режимах: рис. 3а – стационарный режим с модуляцией внешнего магнитного поля на частоте 100 кГц, рис. 3б – эхо-детектированный спектр, представляющий зависимость интенсивности электронного спинового эхо от магнитного поля в стандартной двух импульсной последовательности Хана. Надписи на рис. 3 показывают позицию примесного иона в кристаллической решётке (M1 или M2) и тип центра (D – димерный ассоциат, S – одиночный ион). Для иона в позиции M2 наблюдается только одна резонансная линия. Для ионов в позиции M1 наблюдаются три пары резонансных линий. Средняя пара соответствует двум магнитно-неэквивалентным центрам, образованным одиночными ионами иттербия. Для димерного ассоциата наблюдаются две крайние группы парных линий M1(D-1) и M1(D-2). Звездочками отмечены резонансные линии, для которых проводились измерения частоты нутаций Раби. Для димерного ассоциата это линия в магнитном поле 145.8 мТл, а для одиночного иона в позиции M1 – линия в магнитном поле 150.1 мТл.

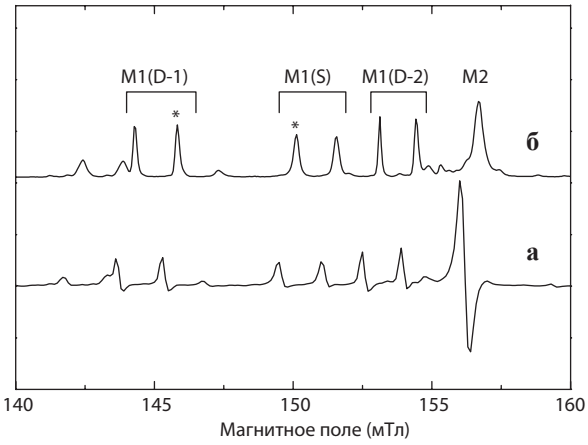


Рис. 3. Спектры парамагнитных центров иттербия в форстерите, записанные в стационарном режиме с модуляцией магнитного поля (**а**) и в режиме эхо-детектирования (**б**).

Для резонансного перехода с изменением магнитного квантового числа $\Delta m = \pm 1$ частота нутаций зависит от величины полного эффективного электронного спина парамагнитного центра S [8]:

$$\nu(m_s, m_s+1) = \frac{g\beta_e H_1}{h}\sqrt{S(S+1) - m_s(m_s+1)}\ , \qquad (1)$$

где S – полный эффективный электронный спин парамагнитного центра, (S = 1/2 для одиночного иона и S = 1 для димерного ассоциата), m_s – проекция электронного спина на ось квантования, g – эффективный g-фактор, β_e – магнетон Бора, H_1 – амплитуда магнитной компоненты микроволнового поля. Частота нутаций Раби определялась по зависимости амплитуды спинового эхо от длительности первого микроволнового импульса в двух-импульсной последовательности Хана. Длительность второго, 90° импульса, при которой сигнал эхо имел максимальную интенсивность, составляла 11 и 16 нс для димерного ассоциата и одиночного иона, соответственно. Оказалось, что при одних и тех же экспериментальных условиях измеренная частота нутаций Раби для димерного ассоциата и одиночного иона равна ν_{dim} = 22.4 ± 1 МГц и ν_{single} = 16.2 ± 1 МГц, соответственно. Отношение $\nu_{dim}/\nu_{single} \approx$ 1.38 очень близко к теоретическому соотношению для центров со спинами S = 1 и S = 1/2, вычисленному с использованием выражения (2) $\nu_{dim}/\nu_{single} = 2^{1/2} = 1.414$.

На рис. 2 видно, что интенсивность резонансных линий димерного ассоциата в позиции M1 (правая и левая пары линий) превышает интенсивность линий одиночного иона (центральная пара). Поскольку ориентационные зависимости для одиночных ионов и димерных ассоциатов практически идентичны, вероятности резонансных переходов для одиночного иона и димерного ассоциата также не должны сильно отличаться. Это означает, что концентрация димерных ассоциатов превышает концентрацию одиночных ионов. В то же время, при малой концентрации примесных ионов и строго статистическом их распределении в магниевой подрешётке отношение концентрации димерных ассоциатов к концентрации одиночных ионов должно быть чрезвычайно малым [9]. Таким образом, в форстерите, легированном иттербием, существует механизм, благоприятствующий самоорганизации примесных ионов иттербия в димерные ассоциаты. Мы полагаем, что этот механизм связан с необходимостью компенсировать избыточный катионный заряд при гетеровалентном замещении трёхвалентным ионом иттербия двухвалентного иона магния. При этом, для соблюдения электронейтральности кристалла требуется специальный компенсатор заряда, формирование которого увеличивает внутреннюю энергию кристаллической решётки. При отсутствии специальных компенсаторов минимальное повышение внутренней энергии достигается при формировании примесных ионов иттербия в димерные ассоциаты, состоящие из двух трёхвалентных примесных ионов, замещающих три иона магния с образованием магниевой вакансии вблизи ионов иттербия.

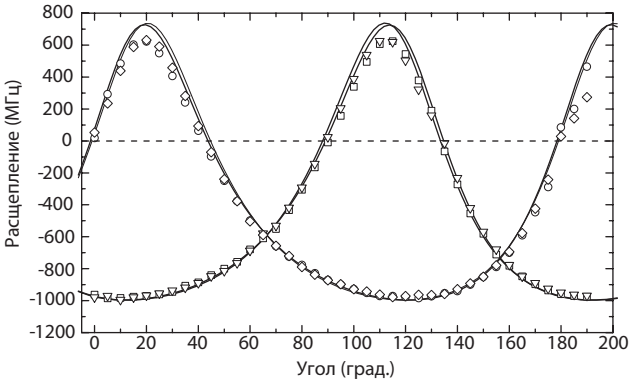


Рис. 4. Зависимость энергии спин-спинового взаимодействия между ионами димерного ассоциата иттербия в форстерите от ориентации магнитного поля в плоскости (*bc*). Значки – эксперимент для четырёх магнитно неэквивалентных позиций ионов иттербия, линии – расчёт.

Изучение ориентационных зависимостей резонансных линий на спектрах ЭПР при вращении магнитного поля в трёх кристаллографических плоскостях позволило определить магнитные характеристики всех наблюдаемых центров иттербия. Для вычисления теоретических зависимостей использовался пакет программ EasySpin [10, 11]. Наилучшее совпадение экспериментальных данных с расчётом получено при главных значениях *g*-тензора $g_x = 4.981$; $g_y = 2.083$; $g_z = 0.561$ и углах Эйлера (последовательность поворотов *zyz*), определяющих ориентацию осей *g*-тензора (*x*,*y*,*z*) относительно кристаллографических осей (*a*,*b*,*c*) для одного из магнитно-неэквивалентных центров, $\alpha = 307.3°$; $\beta = 83.6°$; $\gamma = 67.3°$. Для трёх других центров углы Эйлера можно получить, используя свойства симметрии кристаллической решётки. Для тензора спин-спинового взаимодействия получены главные значения $J_x = -146.8$ МГц, $J_y = 1121.8$ МГц, $J_z = 553.1$ МГц и углы Эйлера $\alpha = 275.4°$, $\beta = 40.2°$, $\gamma = 296.8°$.

С точки зрения перспективности применения димерных ассоциатов иттербия в форстерите для реализации квантовых вычислений важное значение имеют величина и характер спин-спинового взаимодействия между ионами димерного ассоциата. Оказалось, что в величину спин-спинового взаимодействия вносят вклад обменное и диполь-дипольное взаимодействия. Тем не менее, при изменении ориентации магнитного поля изменяются не только величина, но и знак спин-спинового взаимодействия. Это хорошо видно на рис. 4, где представлена ориентационная зависимость энергии спин-спинового взаимодействия (в единицах частоты) при вращении магнитного поля в плоскости (*bc*).

Заключение

Показано, что примесные ионы иттербия входят в кристаллическую решётку монокристаллов форстерита в виде одиночных ионов и димерных ассоциатов, концентрация которых на несколько порядков превышает концентрацию ассоциатов, образующихся случайно при статистическом распределении примесных ионов по кристаллу. Данные ЭПР спектроскопии показывают, что димерные ассоциаты состоят из пары ионов трёхвалентного иттербия в кристаллографических позициях M1 с магниевой вакансией между ними в цепочке трёх кислородных октаэдров, параллельной кристаллографической оси *c*.

Спин-спиновое взаимодействие между ионами димерного ассоциата имеет преимущественно диполь-дипольный характер, поэтому величина и знак спин-спинового взаимодействия зависят от направления внешнего магнитного поля. Это делает димерные ассоциаты иттербия в монокристаллах синтетического форстерита перспективной основой для практической реализации элементарных алгоритмов квантовых вычислений на основе электронных спинов.

Работа выполнена в сотрудничестве с Е. В. Жариковым и К. А. Субботиным (Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Москва) и В. Д. Дудниковой (Московский государственный университет, Москва) при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Республики Татарстан в рамках научного проекта № 15-42-02324 «р_а».

Литература

1. de Riedmatten H., Afzelius M., Staudt M.U., Simon C., Gisin N.: Nature **456**, 773 (2008)
2. Thiel C.W., Böttger T., Cone R.L.: J. Lumin. **131**, 353 (2011)
3. Bonarota M., Le Gouët J.-L., Chanelière T.: New J. Phys. **13**, 013013 (2011)
4. Thiel1 C.W., Macfarlane R.M., Sun Y., Böttger T., Sinclair N., Tittel W., Cone R.L.: Laser Phys. **24**, 106002 (2014)
5. Luis F., Repolles A., Martınez-Perez M.J., Aguila D., Roubeau O., Zueco D., Alonso P.J., Evangelisti M., Camon A., Sese J., Barrios L.A., Aromi G.: Phys. Rev. Lett. **107**, 117203 (2011)
6. Гайстер А.В., Жариков Е.В., Коновалов А.А., Субботин К.А., Тарасов В.Ф.: Письма в ЖЭТФ **77**, 753 (2003)
7. Konovalov A.A., Lis D.A., Subbotin K.A., Tarasov V.F., Zharikov E.V.: Appl. Magn. Reson. **45**, 193 (2014)
8. Schweiger A., Jeschke G.: Principles of Pulse Electron Paramagnetic Resonance. N.Y.: Oxford University Press 2001. p. 429.
9. Motokawa M., Ohta H., Makita N., Ikeda H.: J. Phys. Soc. Jpn. **61**, 322 (1992)
10. Stoll S., Schweiger A.: J. Magn. Reson. **78**, 42 (2006)
11. Stoll S., Schweiger A.: Biol. Magn. Reson. **27**, 299 (2007)

ЭПР и оптическая спектроскопия ионов Yb^{3+} в кристаллах гексагонального перовскита $RbMgF_3$

М. Л. Фалин, В. А. Латыпов, Г. М. Сафиуллин

Лаборатория радиоспектроскопии диэлектриков

Методами ЭПР и оптической спектроскопии проведено исследование трёх парамагнитных центров (ПЦ) тригональной симметрии, образуемых ионом Yb^{3+} в гексагональном кристалле $RbMgF_3$. Определены параметры спин-гамильтонианов ПЦ и установлены возможные кристаллографические позиции примесных ионов. Используя методики разделения оптических линий в спектрах возбуждения, люминесценции и времяразрешённой люминесценции были идентифицированы положения линий трёх структурно-неэквивалентных ионов Yb^{3+} в оптических спектрах.

Введение

Фторперовскиты $RbMgF_3$, активированные ионами переходных металлов, привлекают внимание благодаря их применению для оптически стимулированной люминесценции и использованию в качестве детекторов радиации [1–3]. Ранее методом ЭПР исследовались кристаллы, активированные только ионами группы железа [4–8]. Для некоторых редкоземельных ионов (РЗ: Eu^{2+} и Er^{3+}) имеются оптические данные [9, 10] и, насколько нам известно, отсутствуют литературные данные по изучению РЗ ионов методом ЭПР в этом кристалле.

Кристалл $RbMgF_3$ имеет гексагональную структуру (аналог h-$BaTiO_3$) и принадлежит к пространственной группе P63/mmc (рис. 1). Элементарная ячейка имеет параметры a = 5.828 Å, c = 14.195 Å [11]. $RbMgF_3$ имеет две различные кристаллографические шестикратные позициии катиона Mg^{2+}, один из которых – Mg_I^{2+} занимает позицию 2a и имеет симметрию C_{3v} (MgF_6 – тригональная локальная структура), а другой, Mg_{II}^{2+}, занимает позицию 4f и имеет симметрию C_{3v} (Mg_2F_9 – тригональная локальная структура). Аналогичным образом, имеются две различные кристаллографические двенадцатикратные позиции катиона Rb^+. Один, Rb_I^+, занимает позицию 2b и имеет симметрию D_{3d}, а другой, Rb_{II}^+, занимает позицию 4f и имеет симметрию C_{3v}. Данное исследование посвящено первому изучению примесных РЗ парамагнитных центров (ПЦ), образованных ионами Yb^{3+} в монокристалле $RbMgF_3$, методами ЭПР и оптической спектроскопии.

Эксперимент

Кристаллы были выращены методом Бриджмена. Экспериментальные исследования спектров ЭПР проводились на модифицированном спектрометре ERS-231 (Германия) в X-диапазоне. Для регистрации ЭПР при температурах 5–80 К использовался гелиевый проточный криоостат CRYO202ESR (Россия). Рентгенографическое исследование подтвердило гексагональную структуру $RbMgF_3$ и определило кристаллографические направления кристалла.

Спектры люминесценции, возбуждения и кинетики люминесценции регистрировались на автоматизирован-

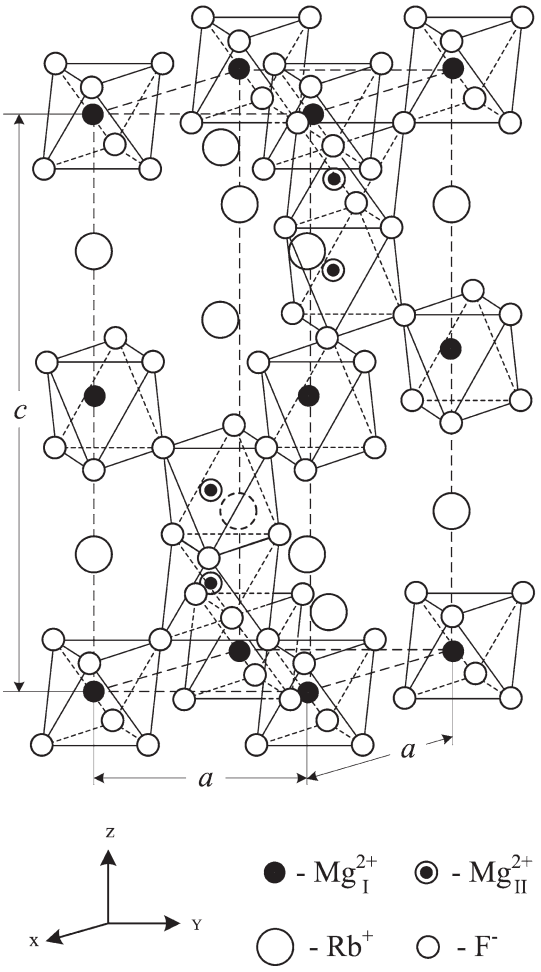


Рис. 1. Элементарная ячейка $RbMgF_3$ [11], где ось Z параллельна гексагональной оси кристалла.

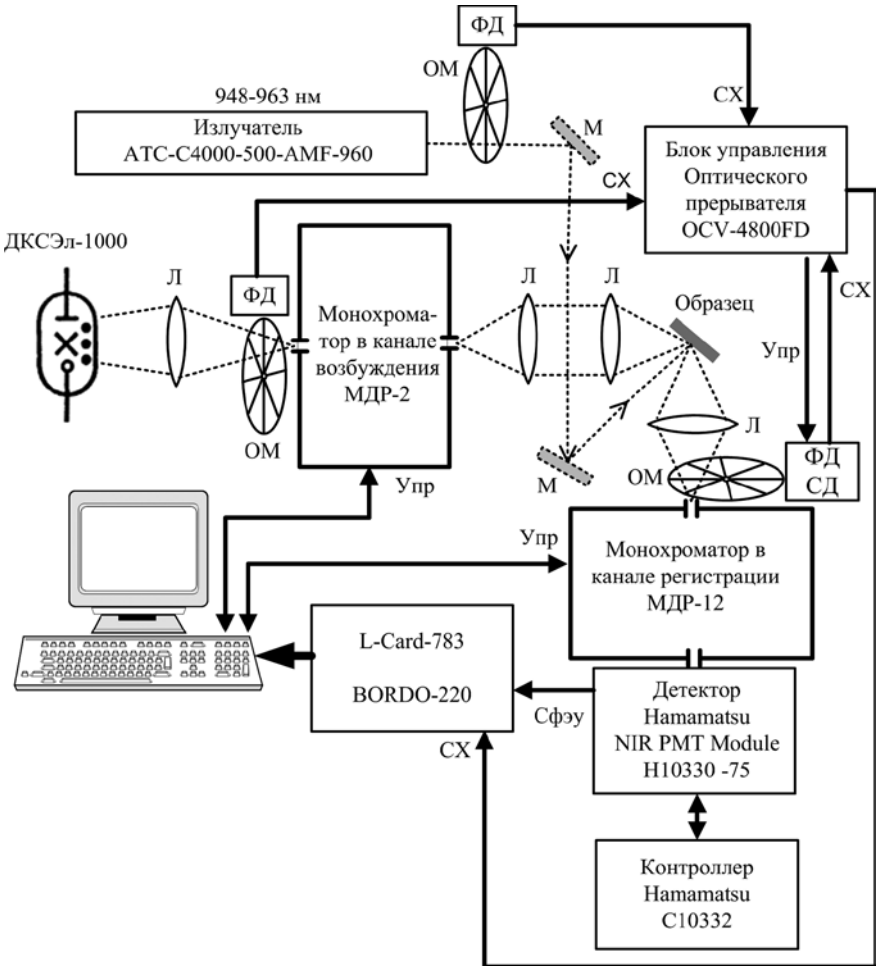


Рис. 2. Блок-схема установки для регистрации спектров времяразрешённой люминесценции, кинетики люминесценции и спектров возбуждения. Обозначения на схеме: Л – кварцевая линза; М – ИК-зеркало; ОМ – оптический модулятор; ФД – фотодиодная оптопара; СД – двигатель с синхронизацией от внешнего TTL-сигнала; СХ – сигнал синхронизации; Упр – сигналы управления двигателями устройств и их синхронизация; Сфэу – регистрируемый сигнал с детектора (ФЭУ).

ном спектрометре, который реализован на стандартных монохроматорах МДР-2 и МДР-12, размещённых в канале возбуждения и регистрации, соответственно (рис. 2).

Люминесценция возбуждалась лампой ДКСЭл-1000 или полупроводниковым лазерным диодом ATC-C4000-500-AMF-960 (Россия) мощностью 1 Вт с шириной линии излучения порядка 2 нм и температурной перестройкой длины волны излучения от 948 до 963 нм. Спектры времяразрешённой люминесценции регистрировались при импульсном возбуждении в 3D-формате с координатами: X – длина волны, Y – время, Z – интенсивность. Из полученных данных брались наиболее характерные сечения по времени для спектров люминесценции и по длине волны для кинетики люминесценции.

Сигнал с образца фокусировался на входную щель монохроматора МДР-12, настроенного на выбранную длину волны люминесценции. Излучение также модулировалось механическим модулятором и при резонансном возбуждении применялся стробоскопический режим регистрации. В качестве детектора использовался охлаждаемый ФЭУ NIR PMT Module H10330-75 (Япония).

Экспериментальные результаты

Во всех образцах наблюдался спектр ЭПР Mn^{2+}, присутствующего в качестве неконтролируемой примеси. В зависимости от условий синтеза кристаллов наблюдалось перераспределение интенсивностей линий ЭПР ионов Mn^{2+} и Yb^{3+}. Поведение температурной зависимости ЭПР спектров показало, что примесные центры соответствуют температурной области наблюдения иона Yb^{3+}. Анализ угловых зависимостей линий ЭПР при вращении магнитного поля H в плоскостях параллельной и перпендикулярной гексагональной оси Z показал, что ионы Yb^{3+} в $RbMgF_3$ образуют три структурно-неэквивалентных парамагнитных комплекса аксиальной симметрии Yb^{3+}(I, II, III) (рис. 3 и 4, соответственно). Спектр ЭПР каждого комплекса состоит из спектральных линий изотопов иттербия: ^{четн}Yb (I = 0), ^{171}Yb (I = 1/2) и ^{173}Yb (I = 5/2). Т.к. в спектрах ЭПР ионов Yb^{3+} наиболее интенсивные линии обусловлены чётными изотопами иттербия, сверхтонкая структура нечётных изотопов из-за слабой интенсивностией линий не анализировалась. Полученные результаты параметризации

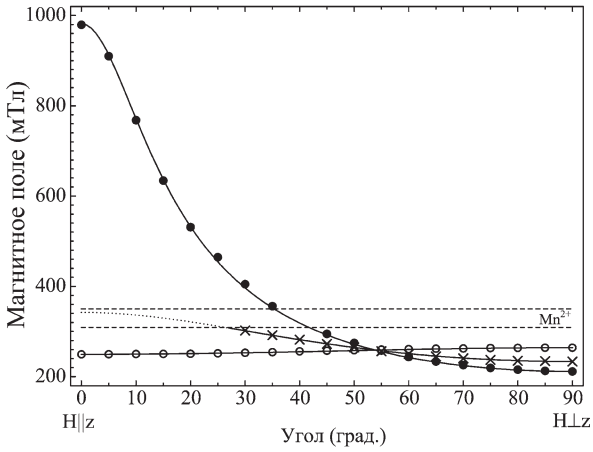


Рис. 3. Угловая зависимость спектров ЭПР Yb^{3+} в $RbMgF_3$ при вращении магнитного поля H в плоскости параллельной гексагональной оси кристалла. T = 4.2 К, ν = 9.342 ГГц. Эксперимент: ○ – Yb^{3+}(I), × – Yb^{3+}(II), ● – Yb^{3+}(III); теория – сплошная линия.

спин-гамильтониана приведены в таблице 1, где приведены также данные для ионов Yb^{3+} кубической симметрии в кристалле $KZnF_3$ [13]. Основной терм $^2F_{7/2}$ иона Yb^{3+} в кубическом кристаллическом поле расщепляется на дублеты Г6, Г7 и квартет Г8. Для 6-кратной координации основным состоянием будет Г6, для 12-кратной – Г7 или Г8. Теоретические значения g-факторов дублетов Г6 и Г7 равны: g(Г6) = $7\Lambda/3$ = 2.6628, g(Г7) = 3Λ = 3.4237, где Λ = 1.14122 [14] – фактор Ланде. Известно, что в случае отклонения кристаллического поля от кубической симметрии для редкоземельных ионов работает правило среднего g-фактора: $\tilde{g} = 1/3(g_x + g_y + g_z) \simeq g_{куб}$ [15]. Используя данное сравнение значений $\tilde{g}$ и изотропных g-факторов кубических крамерсовых дублетов Г6 и Г7, можно на основании модели точечных зарядов сделать вывод о ближайшем окружении РЗ иона. Из таблицы 1 видно, что наблюдаемые ПЦ Yb^{3+} (I, II, III) находятся в

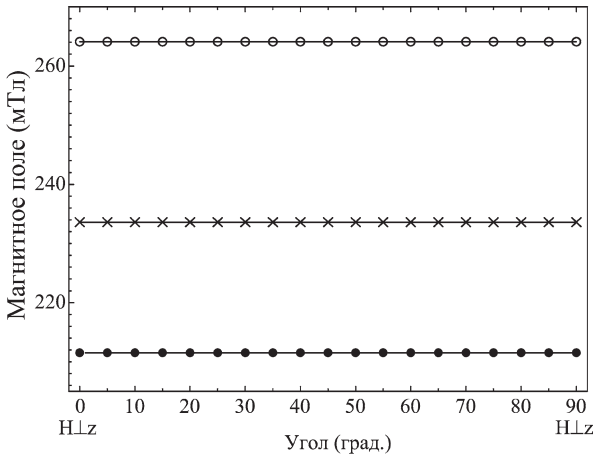


Рис. 4. Угловая зависимость спектров ЭПР Yb^{3+} в $RbMgF_3$ при вращении магнитного поля H в плоскости перпендикулярной гексагональной оси кристалла. T = 4.2 К, ν = 9.342 ГГц. Эксперимент: ○ – Yb^{3+}(I), × – Yb^{3+}(II), ● – Yb^{3+}(III); теория – сплошная линия.

Таблица 1. Экспериментальные значения g-факторов иона Yb^{3+}(I, II, III) в $RbMgF_3$. Данные для Yb^{3+} кубической симметрии в $KZnF_3$ представлены для сравнения. Знак (–) для g-факторов определён теоретически. $\tilde{g} = 1/3(g_{\parallel} + 2g_{\perp})$.

Кристалл	a_0 (Å)	Yb^{3+}	$g_{\parallel}$	$g_{\perp}$	$\tilde{g}$	Ссылки
$RbMgF_3$	a = 5.828	I	(–)2.667	(–)2.527	(–)2.574	[настоящая
	c = 14.195	II	(–)1.975	(–)2.855	(–)2.582	работа]
	[11]	III	(–)0.685	(–)3.163	(–)2.377	
$KZnF_3$	4.040 [12]		2.591			[13]

состояниях Г6, т.е. ионы Yb^{3+} в данном случае замещают только катионы Mg^{2+} в позициях кристалла 2a и 4f и аксиальность ПЦ имеет тригональный тип. Метод ЭПР не позволяет идентифицировать ионы Yb^{3+} между этими позициями, но это возможно сделать на основе данных расчёта наблюдаемых оптических спектров.

В пользу того, что ионы Yb^{3+} замещают катионы Mg^{2+} говорит так же тот факт, что ионные радиусы для рассматриваемых ионов в шестикратной координации весьма близки: $R(Mg^{2+})$ = 0.720 Å и $R(Yb^{3+})$ = 0.868 Å, тогда как в двенадцатикратной координации $R(Rb^{+})$ = 1.71 Å [16].

Оптическая спектроскопия

Полученные спектры возбуждения и люминесценции, позволили провести предварительный анализ спектральных и временных характеристик для разных типов ПЦ в $RbMgF_3$ и построить общую схему уровней Yb^{3+} (вставка на рис. 5).

В спектрах возбуждения разделение спектров для разных ПЦ возможно осуществить селективным выбором регистрируемой длины волны излучения люминесценции соответствующего ПЦ. Применяя режим стационарной регистрации, без использования стробоскопического метода, и регистрируя сигнал люминесценции на нерезонансных переходах линий 3, 4, получили спектры возбуждения для трёх ПЦ Yb^{3+}(1, 2, 3) ($\lambda_{рег}$ = 990 нм (ν = 10101 см$^{-1}$)) (рис. 5а) и Yb^{3+}(2, 3) ($\lambda_{рег}$ = 997 нм (ν = 10030 см$^{-1}$)) (рис. 5б). Время жизни кинетики люминесценции с разных возбуждённых уровней ПЦ Yb^{3+} отличается почти на три порядка. С первого нижнего возбуждённого уровня это время микросекундного порядка (рис. 5в). Начальная интенсивность сигнала люминесценции с этого уровня, соответственно, на порядки больше. Со второго возбуждённого уровня – миллисекундного порядка (рис. 5г, д, е). Поэтому спектры возбуждения показанные на рис. 5а, б, соответствуют “короткоживущей” и наиболее интенсивной люминесценции с нижнего (первого) возбуждённого уровня. Резонансный переход для этого уровня обозначен номером 7 (рис. 5а, б, в). Регистрация спектра возбуждения второго возбуждённого уровня не является необходимой, т.к. положение линии, соответствующей нерезонансному переходу (9), достаточно определить

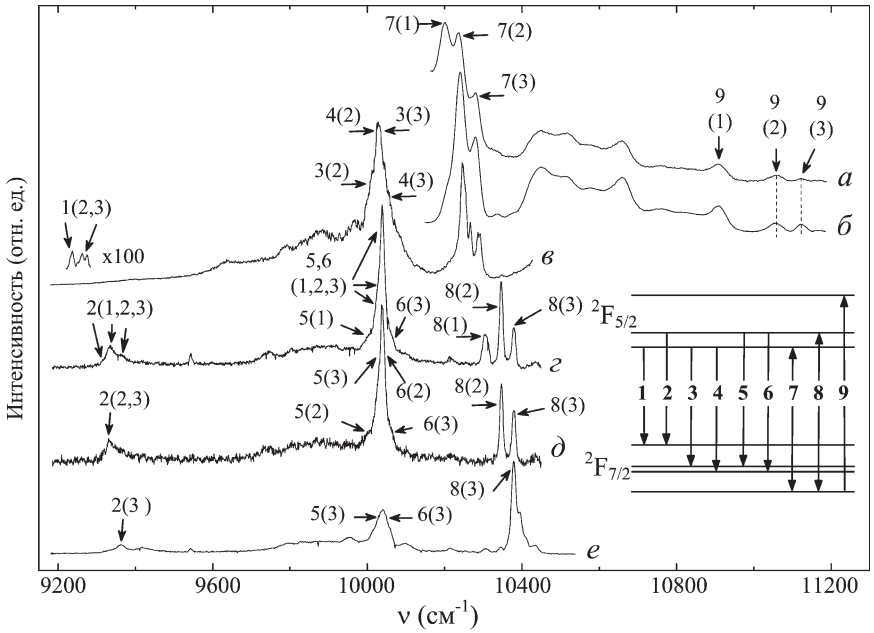


Рис. 5. Спектры возбуждения и спектры люминесценции Yb^{3+}(1, 2, 3) в $RbMgF_3$ при T = 77 К. Обозначения цифр на спектрах: первая – номера оптических переходов на вставке, в скобках – принадлежность к определённому ПЦ. Вставка – схема энергетических уровней Yb^{3+}.

из уже имеющихся спектров возбуждения, а положение линий резонансных переходов (8), легко определяется из спектров люминесценции рис. 5г, д, е.

Спектры люминесценции и кинетика люминесценции, изображённые на рис. 5г, д, е, регистрировались в стробоскопическом режиме. Времена жизни кинетики люминесценции, измеренные на линиях резонансного перехода (8), и "времяразрешённые" спектры люминесценции для разных ПЦ Yb^{3+} со 2-го возбуждённого уровня значительно различаются: Yb^{3+}(1) (τ = 2.4 мс), Yb^{3+}(2) (τ = 6.9 мс), Yb^{3+}(3) (τ = 10.5 мс) – см. рис. 5г, д, е, и таблицу 2. "Времяразрешённые" спектры люминесценции, показанные на рис. 5г и д, соответствуют временным сечениям с t = 0 и 490 мкс. На рис. 5г наблюдаются три линии для резонансного перехода (8), соответствующие трем неэквивалентным ПЦ Yb^{3+}(1, 2, 3). На рис. 5г наблюдаются две линии для резонансного перехода (8), соответствующие двум неэквивалентным Yb^{3+}(2, 3). Таким образом, при временном сдвиге t = 490 мкс вклад в спектр более быстрой составляющей становится незначительным и наблюдается спектр ПЦ с более длинным временем жизни.

В спектрах люминесценции спектральное разделение (по длинам волн) осуществимо селективным возбуждением отдельных ПЦ. На рис. 5г и е показаны спектры, зарегистрированные с одинаковыми временными характеристиками (временное сечение t = 0) при возбуждении на длине волны λ = 952 нм (ν = 10504 см$^{-1}$) (Yb^{3+}(1, 2, 3) и λ = 962.5 нм (ν = 10390 см$^{-1}$) (Yb^{3+}(3)), соответственно.

Предполагается, что полученные из анализа оптических данных потенциалы кристаллических полей исследуемых центров позволят получить сведения не только о схеме уровней энергии каждого ПЦ, но и о структурных моделях ближайшего окружения ионов Yb^{3+}.

Таблица 2. Экспериментальные оптические линии Yb^{3+} (1, 2, 3) в $RbMgF_3$ в спектрах люминесценции, возбуждения (см$^{-1}$) и времена жизни τ (мс).

Переход	№ линий Yb^{3+}	Линии люминесценции, возбуждения Yb^{3+} (1)	(2)	(3)	τ (1)	(2)	(3)
$^2F_{5/2} \rightarrow {}^2F_{7/2}$	1	9237	9262	9276	~0.1	~0.1	~0.1
	2	9334	9333	9362	—	—	—
	3	10000	10028	10058		~0.1	
	4	10000	10028	10082		~0.1	
	5	10011	10037	10056	—	—	—
	6	10011	10037	10056	—	—	—
	7	10201	10237	10280		~0.1	
	8	10305	10347	10378	2.4	6.9	10.5
$^2F_{5/2} \leftrightarrow {}^2F_{7/2}$	7	10201	10237	10280			
	8	10305	10347	10378			
	9	10908	11056	11124			

Данная работа была поддержана грантом Президиума Российской академии наук № 32. Авторы благодарны С. В. Петрову (ИФП, Москва) за предоставленные образцы, В. А. Шустову за рентгеноструктурный анализ кристаллов и А. М. Леушину (КПФУ, Казань) за помощь в предварительной теоретической интерпретации.

Литература

1. Dotzler C., Williams G.V.M., Rieser U., Robinson J.: Appl. Phys. **105**, 023107 (2009)
2. Williams G.V.M., Raymond S.G.: Radiat. Meas. **46**, 1102 (2011)
3. Koumvakalis N., Sibley W.A.: Phys. Rev B **13**, 4509 (1976)
4. Dance J.M., Kerkouri N.: C.R. Acad. Sci. C **289**, 425 (1979)
5. Kerkouri C.R., Dance J.M.: Mater. Res. Bull. **19**, 751 (1984)
6. Dance J.M., Kerkouri C.R.: Acad. Sci. Paris **289**, 425 (1979)
7. Dance J.M., Boireau A., Le Lirzin A., Lestienne B.: Solid State Commun. **91**, 475 (1994)
8. Ebisu H., Takeuchi H., Arakawa M.: Phys. Status Solidi B **247**, 983 (2010)
9. Sardar D.K., Sibley W.A.: J. Lumin. **27**, 273 (1982)
10. Shinn M.D., Windscheif J.C., Sardar D.K., Sibley W.A.: Phys. Rev. B **26**, 2371 (1982)
11. Dance J.M., Kerkouri N., Tressaud A.: Mat. Res. Bull. **14**, 869 (1979)
12. Schrama A.H.M.: Physica **66**, 131 (1973)
13. Antipin A.A., Klimachev A.F., Korableva S.L., Livanova L.D., Fedii A.A.: Fiz. Tverd. Tela **17**, 1042 (1975)
14. Cabezas A.Y., Lindgren I.P.K.: Phys. Rev. **120**, 920 (1960)
15. Lewis H.R., Sabisky E.S.: Phys. Rev. **130**, 1370 (1963)
16. Shannon, R.D.: Acta Crystallogr. A **32**, 751 (1976)

Парамагнитные дефекты в кристаллах ZnSe, активированных ионами железа

Г. С. Шакуров

Лаборатория радиоспектроскопии диэлектриков

Исследованы спектры электронного парамагнитного резонанса монокристаллов ZnSe, легированных железом. Кроме кубических центров Mn^{2+}, а также тетрагональных центров Cr^{2+} обнаружены моноклинные комплексы Fe^{3+}, локально компенсированные ионами Cu^{+}. Измерены начальные расщепления моноклинных центров, определены параметры спинового гамильтониана.

Кристаллы ZnSe, активированные ионами группы железа, активно используются в качестве рабочей среды для широкополосных лазеров среднего ИК-диапазона. Эти лазеры применяются в системах локации, экологического контроля загрязнения окружающей среды, анализа газовых смесей, а также в различных медицинских целях [1]. Для оптимизации лазерных свойств необходима информация о зарядовых состояниях легирующих ионов, которая может быть получена методом ЭПР. Кроме того, ЭПР позволяет детектировать наличие в кристалле посторонних примесей. В случае кристаллов ZnSe:Fe с точки зрения лазерных свойств очень важно соотношение концентраций ионов Fe^{+} (электронный спин $S = 3/2$), Fe^{2+} ($S = 2$) и Fe^{3+} ($S = 5/2$).

Исследованные кристаллы селенида цинка выращивались в кварцевой ампуле из паровой фазы методом физического транспорта на затравку ZnSe в атмосфере гелия [2]. Анализ содержания примесей дал величину концентрации железа ($\sim 2 \cdot 10^{18}$ см$^{-3}$). Для анализа использовался метод масс-спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой (NexION 300D, Perkin Elmer Inc.). Из неконтролируемых примесей наибольшую массовую концентрацию имела примесь Cu ($4.7 \cdot 10^{-4}$ m%). Кроме того, сравнимые с Fe концентрации могли иметь ионы кислорода и дефекты нестехиометрии (в основном V_{Zn}).

Измерения в диапазоне частот (37–850 ГГц) выполнены при температуре жидкого гелия на широкополосном ЭПР-спектрометре, созданном на основе генераторов микроволнового излучения – ламп обратной волны. Измерения спектров парамагнитного резонанса при комнатной температуре и 110 К проводились на спектрометре трёхсантиметрового диапазона EMX Plus Bruker в полях до 1450 мТ.

Исследуемые кристаллы ZnSe имеют структуру кубического сфалерита (цинковой обманки) с пространственной группой $T_d^2(\overline{F}43m)$ и параметром элементарной ячейки 5.66 Å. По расположению атомов она подобна структуре алмаза, однако из-за наличия атомов двух сортов не имеет центра инверсии. Это гранецентрированная кубическая решётка, в которой заселена половина тетраэдрических пустот.

Проведённые измерения частотно-полевых зависимостей междублетных переходов центров Fe^{3+} (рис. 1), дали для расщеплений в нулевом магнитном поле следующие величины: 124 ($\pm 1/2 \leftrightarrow \pm 3/2$) и 203 ГГц ($\pm 3/2 \leftrightarrow \pm 5/2$).

С целью определения параметров спинового гамильтониана моноклинных центров Fe^{3+} в ZnSe было проведено детальное исследование ориентационного поведения ЭПР спектра на частоте 9156 МГц при вращении магнитного поля в плоскости (110) при комнатной температуре. Результаты приведены на рис. 2. Из вида спектров видно, что вблизи $g = 2$ наблюдается сигналы сверхтонкой структуры кубических центров Mn^{2+}, исследованных авторами [3]. Остальные интенсивные сигналы можно поделить на две группы: первая – узкие сигналы (≈2 мТ), наблюдаемые при $\mathbf{B} \| C_2$ в полях 164 и 230 мТ, вторая – более широкие (≈5 мТ), наблюдаемые в диапазоне 70–440 мТ.

При анализе угловых зависимостей второй группы сигналов было замечено, что они качественно аналогичны зависимостям моноклинного дипольного комплекса Fe^{3+} в ZnSe [4, 5], заместившего ион Zn^{2+} и имеющего в ближайшей катионной позиции (в направлении <110> на расстоянии 0.4 нм) ион Cu^{+}. Исследованные в работах [4, 5] кристаллы ZnSe, легированные железом и медью,

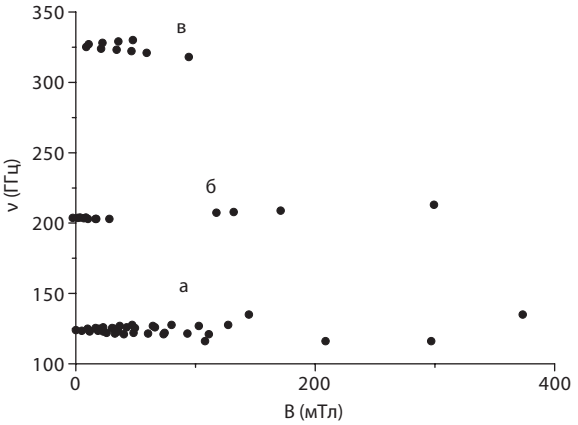


Рис. 1. Частотно-полевые зависимости междублетных резонансных переходов иона Fe^{3+} в кристалле ZnSe в произвольной ориентации магнитного поля. **а** переходы $\pm 1/2 \leftrightarrow \pm 3/2$; **б** переходы $\pm 3/2 \leftrightarrow \pm 5/2$; **в** переходы $\pm 1/2 \leftrightarrow \pm 5/2$.

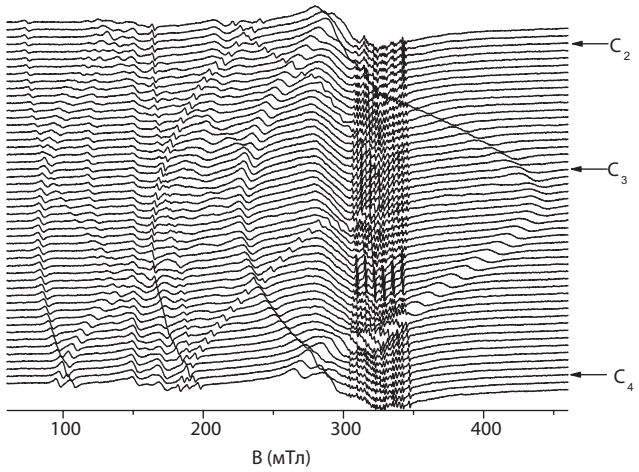


Рис. 2. Ориентационное поведение спектра ЭПР при комнатной температуре на частоте 9156 MHz при вращении магнитного поля в плоскости (110).

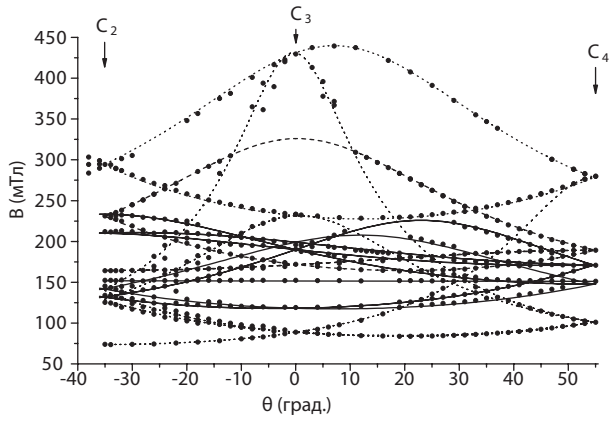


Рис. 3. Ориентационное поведение экспериментальных и расчётных положений сигналов при вращении магнитного поля в плоскости (110) на частоте 9156 МГц. Сплошные кривые – переходы моноклинных центров Fe^{3+} в среднем дублете (±3/2), пунктирные – в нижнем дублете (±1/2). Штриховые кривые – переходы тригональных центров со спином 3/2 в нижнем дублете (±1/2).

содержат 12 одинаковых, но различно ориентированных Fe^{3+}-Cu^{+} комплексов с симметрией C_S. В работе [4] наблюдались сигналы указанных центров только в нижнем (±1/2) крамерсовом дублете, авторам [5] удалось детектировать переходы как в нижнем, так и в среднем (±3/2) дублетах.

Описание спектра наблюдаемых нами моноклинных центров Fe^{3+} проводилось спиновым гамильтонианом в определении [6]

$$\mathscr{H}_{sp} = g\beta(\mathbf{BS}) + \frac{1}{3}(b_{20}O_{20} + b_{21}O_{21} + b_{22}O_{22}) + \frac{1}{60}(b_{40}O_{40} + b_{41}O_{41} + b_{42}O_{42} + b_{43}O_{43} + b_{44}O_{44}), \quad (1)$$

где g – g-фактор, β – магнетон Бора, O_{nm} – спиновые операторы Стивенса [6], b_{nm} – параметры тонкой структуры. Использовалась следующая локальная система координат: $\mathbf{Z}\|C_3$, ось C_3 лежит в плоскости отражения σ рассматриваемого комплекса, $\mathbf{Y}\perp\sigma$, ось $\mathbf{X}$ естественно располагается тоже в плоскости σ. Система координат работы [4] повёрнута относительно нашей на угол τ вокруг оси $\mathbf{Y}$, в результате чего параметр b_{21} в уравнении (1) обращается в нуль (таблица 1).

Оптимизация с учётом внутридублетных переходов (–1/2↔+1/2 и –3/2↔+3/2), показанных на рис. 2 и 3, величин начальных расщеплений (124 и 203 ГГц), а также угловых зависимостей междублетных переходов позволила определить параметры спинового гамильтониана (таблица 1), причём параметры четвёртого ранга оказались порядка погрешности их определения и поэтому не приводятся. Рисунок 4 демонстрирует описание гамильтонианом (1) с параметрами таблицы 1 угловой зависимости положений сигналов на частоте 125.7 ГГц в плоскости (110).

Первую группу сигналов, приведённую на рис. 2, можно объяснить переходами в нижнем крамерсовом дублете (±1/2, предполагается, что $b_{20} > 0$) тригональ-

Таблица 1. Параметры спинового гамильтониана дипольных центров Fe^{3+}-Cu^{+} и моноклинных центров Fe^{3+} в ZnSe. b_{nm} и среднеквадратичное отклонение расчётных частот от экспериментальных $F(N)$ в МГц, N – число используемых в оптимизации положений переходов.

Параметры	Дипольный центр Fe^{3+}-Cu^{+} [4]		Моноклинный центр Fe^{3+} [данная работа]
$g_{\|}$	2.058	2.058	2.043
$g_{\perp}$	2.058	2.058	2.062
b_{20}	41281*	40567*	51720(15)*
b_{21}	0	24361	31150(150)
b_{22}	17160	17865	23710(15)
b_{40}	—	—	110(20)
$F(N)$			62(87)
τ (°)**	6.6	0	0

* Предполагается, что $b_{20} > 0$.
**При τ = 0° – $\mathbf{Z}\|C_3$ и $b_{21} \neq 0$ (τ – угол между C_3 и $\mathbf{Z}$).

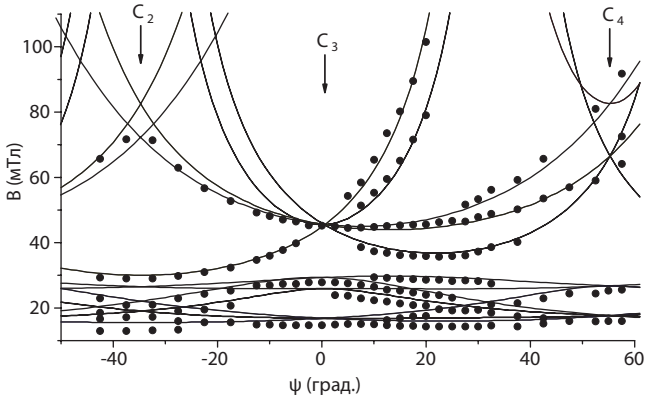


Рис. 4. Ориентационное поведение экспериментальных и расчётных положений сигналов моноклинных центров Fe^{3+} при вращении магнитного поля в плоскости (110) на частоте 125.7 ГГц.

ных центров со спином S = 3/2, большим начальным расщеплением и $g_{\parallel} \approx g_{\perp} \approx 2$. Оптимизация со спиновым гамильтонианом вида при $\mathbf{z}\|C_3$:

$$\mathscr{H}_{sp} = g\beta(\mathbf{BS}) + \frac{1}{3} b_{20} O_{20} \qquad (2)$$

и положениями сигналов, показанными на рис. 3 штриховыми кривыми, дали параметры g = 2.006, b_{20} = 40.5 ГГц.

Поскольку вычисленное нулевое расщепление между двумя дублетами тригонального центра с S = 3/2 в данном случае равно $2b_{20}$ = 81 ГГц, мы осуществили поиск междублетных переходов в этой области частот. Хотя тригональный центр обнаружен не был, регистрировались резонансные переходы типа (0↔±1) иона Cr^{2+}. ЭПР-спектроскопия иона Cr^{2+} (d^4, ^5D, S = 2) в ZnSe хорошо изучена [7–10] и идентификация этой примеси не представляет сложности. Во-первых, угловая зависимость обнаруженных переходов (в статье не показана) свидетельствовала о центрах тетрагональной симметрии, что соответствует литературным данным. Во-вторых, должны были наблюдаться резонансные переходы типа (±1↔ ±2). Энергия в нулевом магнитном поле пропорциональна квадрату спиновой проекции, поэтому отношение энергетических зазоров между спиновыми состояниями равно 1:3. Предприняв поиск сигналов на частотах в три раза больших, мы обнаружили соответствующие линии ЭПР. На рис. 5 представлены спектры ЭПР измеренные вблизи двух расщеплений в нулевом поле в исследуемом кристалле. Причём большое количество линий для переходов (±1↔±2) объясняется тем, что регистрировались линии от нескольких магнитно неэквивалентных центров как для разрешённых, так и для запрещённых переходов.

Тот факт, что в окрестности 81 ГГц не удалось детектировать междублетные переходы тригональных центров, может быть обусловлен большой погрешностью в определении величины начального расщепления в результате оптимизации. В связи с тем, что концентрации железа и меди в кристаллах оказались, как и в [4, 5], сравнимы, нами были проведены измерения формы сигналов при 110 К. Наблюдаемая квартетная структура низкополевых сигналов моноклинных центров Fe^{3+} (рис. 6) убедительно доказывает, что зарядовая компенсация Fe^{3+} осуществляется ионами Cu^{+}. Расщепление указанных ЭПР сигналов обусловлено сверхтонким взаимодействием с ядерными спинами меди (^{63}Cu, I = 3/2, распространенность 69%, ^{65}Cu, I = 3/2, 31%).

Следует заметить, что отношения, приведённых в таблице 1 величин параметров b_{20}, b_{21}, b_{22}, определённых

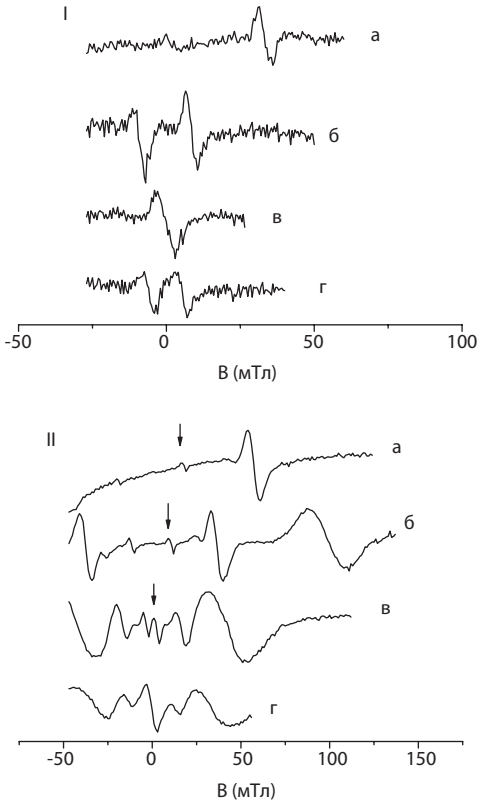


Рис. 5. Вид спектров ЭПР иона Cr^{2+} в кристалле ZnSe вблизи расщеплений в нулевом поле (произвольная ориентация магнитного поля). I – переходы типа 0↔±1, частоты **а** 75 ГГц, **б** 74.5 ГГц, **в** 74.4 ГГц, **г** 74.3 ГГц. II – переходы типа ±1↔±2, частоты **а** 225 ГГц, **б** 224.5 ГГц, **в** 224 ГГц, **г** 223.9 ГГц. Стрелками показаны линии запрещённых переходов с Δm_s = 3.

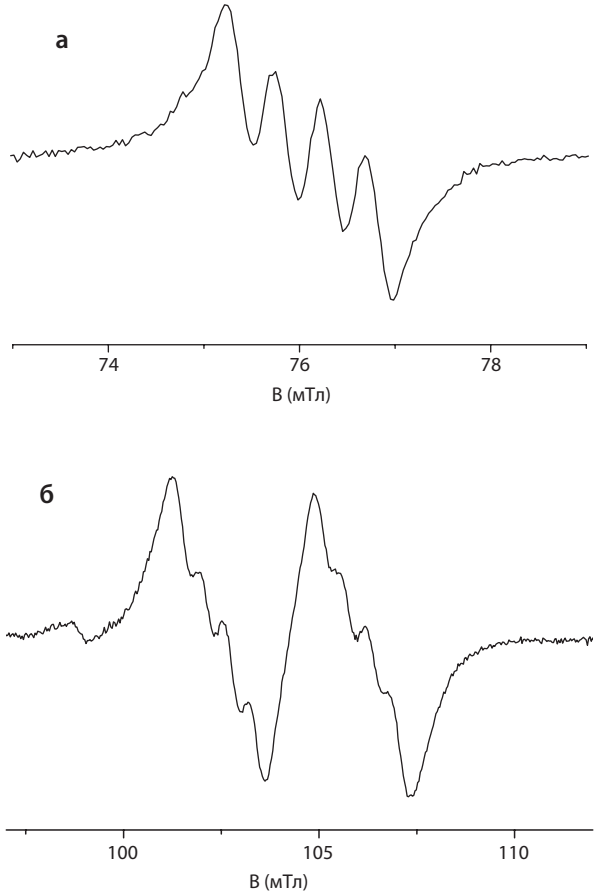


Рис. 6. Форма сигналов низкополевых переходов моноклинных центров Fe^{3+} при $\mathbf{B}\|C_2$ (**а**), $\mathbf{B}\|C_4$ (**б**) и 110 К на частоте 9387 МГц. Два сигнала при $\mathbf{B}\|C_4$ (**б**) и комнатной температуре (см. рис. 2–3) не разрешаются.

нами и авторами [4, 5], практически одинаковы и примерно равны 1.3. Это обусловлено тем, что измерения на одной микроволновой частоте положений только внутридублетных переходов, что было сделано в [4, 5], даёт достоверную информацию о соотношении параметров b_{2m}, тогда как их абсолютные значения слабо зависят от величины начальных расщеплений и поэтому определяются с большой погрешностью. В связи с этим трудно надеяться, что абсолютные значения величин параметров в [4, 5] определены достаточно хорошо. Действительно, расчёт с параметрами спинового гамильтониана, полученными в [4, 5] даёт для расщеплений в нулевом магнитном поле величины 97 и 160 ГГц, которые заметно отличаются от измеренных. Таким образом, нами установлено, что моноклинные центры трёхзарядного железа являются ассоциатами Fe^{3+}-ион Cu^{+}, заместивший ближайший ион Zn^{2+}, при этом получены более адекватные величины параметров спинового гамильтониана.

Обнаруженные и исследованные нами в ZnSe тригональные центры ($S = 3/2$) могут быть обусловлены ионами группы железа Fe^{+}, Ni^{3+}, Cr^{3+}, имеющими спин 3/2 и не обладающими протяжённой сверхтонкой структурой, большей наблюдаемой ширины сигналов.

Работа выполнена совместно с В. А. Важениным, А. П. Потаповым, А. В. Фокиным, М. Ю. Артёмовым (УрФУ, Екатеринбург), В. И. Козловским, Ю. В. Коростелиным (ФИАН, Москва), Д. С. Пыталевым (ИСАН, Троицк).

Литература

1. Крамущенко Д.Д., Ильин И.В., Солтамов В.А., Баранов П.Г., Калинушкин В.П., Студеникин М.И., Данилов В.П., Ильичев Н.Н., Шапкин П.В.: ФТТ **55**, 234–242 (2013)
2. Korostelin Y.V., Kozlovsky V.I.: J. Alloys and Compounds **371**, 25–30 (2004)
3. Title R.S.: Phys. Rev. **131**, 2503–2504 (1963)
4. Holton W.C., deWit M., Estle T.L., Dischler B., Schneider J.: Phys. Rev. **169**, 359–372 (1968)
5. Sielaff N., Nelkowski H., Pradella H., Sahm J., Zink K.: Phys. Stat. Sol. (b) **129**, K177–K180 (1985)
6. Альтшулер С.А., Козырев Б.М.: Электронный парамагнитный резонанс соединений элементов промежуточных групп. М.: Наука 1972. с. 121.
7. Vallin J.T., Watkins G.D.: Phys. Rev. B **9**, 2051–2072 (1974)
8. Boonman M.E.J., Mac W., Twardowski A., Wittlin A., van Bentum P.J.M., Maan J.C., Demianiuk M.: Phys. Rev. B **61**, 5358–5368 (2000)
9. Лончаков А.Т., Подгорных С.М., Соколов В.И., Груздев Н.Б., Шакуров Г.С.: ФТТ **48**, 1610–1613 (2006)

Изучение магнитных свойств стёкол 25%Al_2O_3-25%K_2O-50%B_2O_3 легированных 4%Fe_2O_3

Р. М. Ерёмина, А. В. Шестаков, И. И. Фазлижанов, И. В. Яцык

Лаборатория радиоспектроскопии диэлектриков

Методом магнитного резонанса проведены исследования стёкол 25%Al_2O_3-25%K_2O-50%B_2O_3 (КАВ), легированных 4%Fe_2O_3, до отжига (образец I) и после отжига при 525 °C (образец II). Проведено изучение температурной зависимости спектров электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) данных образцов. Установлено, что в образце I наблюдается три вида парамагнитных центров. Отжиг при температуре выше стеклования калий-алюмо-боратных стёкол + 4%Fe_2O_3 приводит к изменению цвета образца с прозрачного на серый. В спектре отожжённого образца наблюдаются дополнительные две линии ферромагнитного резонанса от двух типов наночастиц гематита различных размеров, образовавшихся при отжиге стекла.

Введение

Материалы современной элементной базы содержат магнитные наночастицы, эти материалы должны быть по возможности инертны к внешним воздействиям – флуктуациям температуры окружающей среды и влажности. Одним из перспективных материалов, в которых формируются нанокристаллы ферритов в том числе оксида железа, является боратное стекло [1]. Такие стёкла обладают более низкими температурами синтеза по сравнению с силикатными стёклами и менее агрессивны к варочным огнеупорам, что в целом снижает стоимость получаемого стекла [2]. Наночастицы в таких стёклах получают при термообработке выше температур стеклования. Это происходит за счёт перестройки структуры стекла. Следует учитывать, что у получившихся наночастиц имеет место дисперсия по размерам, а также химическая связь наночастиц с окружающей матрицей стекла. Метод магнитного резонанса позволяет оценить магнитные свойства наночастиц, такие как температура фазового перехода и поле анизотропии.

В работе [3] исследованы температурные и полевые зависимости намагниченности калий-алюмо-боратных стекол 22.5K_2O-22.5Al_2O_3-55B_2O_3, легированных 2–3 масс.% оксидами железа и марганца, имеющих одинаковый состав, но подвергнутых дополнительной термической обработке при различных температурах, а также образцы различного состава, обработанные при одинаковой температуре. Установлено, что форма, размер, пространственное распределение частиц зависят как от количества вводимых парамагнитных добавок, так и от температуры дополнительной термической обработки, При изучении отожжённых при 560 °C образцов на электронном микроскопе видно, что в стекле формируются частицы, обладающие кубической формой, почти одинакового размера, равномерно распределённые в стекольной матрице.

В работе [4] приведены результаты исследований калий-алюмо-боратных стекол 22.5K_2O-22.5Al_2O_3-55B_2O_3 легированных оксидами Fe_2O_3 и MnO. В данных образцах наблюдались парамагнитные центры с g_{eff} = 4.3 и g_{eff} = 2.0. В случае, когда соотношение между оксидами железа и марганца составляет 3/2, магнитные наночастицы формируются на начальном этапе синтеза. После отжига образцов все стёкла характеризуются линиями ферромагнитного резонанса. Целью данной работы было изучение методами магнитного резонанса и магнитометрии магнитных свойств стекол 25K_2O-25Al_2O_3-50B_2O_3 (КАВ), легированных оксидом 4%Fe_2O_3, до и после отжига.

Эксперимент и обсуждение

Исследуемые образцы предоставлены Ширшневым П.С. из Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики. Технология приготовления стёкол по авторской методике С. А. Степанова приведена в работе [1]. Измерения спектров магнитного резонанса композитов выполнены на спектрометре Bruker ER200 SRC (EMX/plus) в интервале температур от 4.2 до 300 К и на спектрометре Varian в диапазоне от 300 до 679 К в X-диапазоне.

Для всех образцов в спектре магнитного резонанса образца I в измеряемом диапазоне температур наблюдаются три группы линий (рис. 1). При аппроксимации спектров магнитного резонанса использовались выражения для лоренцевой формы линии поликристаллического спектра. На рис. 1 параллельная и перпендикулярная компоненты первой группы практически неразличимы, но описать форму линии, используя только изотропный g-фактор не удаётся. Из описания формы линии в спектре установлено, что эффективные g-фактора первой группы равны $g_{\parallel}$ = 4.3 и $g_{\perp}$ = 4.10, ширина 70 и 200 Ое, соответственно. Положения и ширины линий первой группы не меняются во всём температурном диапазоне от 5 до 679 К. Интегральная интенсивность линий прекрасно описывается законом Кюри ~const/T, как показано на рис. 2. Природа данной линий подробно обсуждалась в

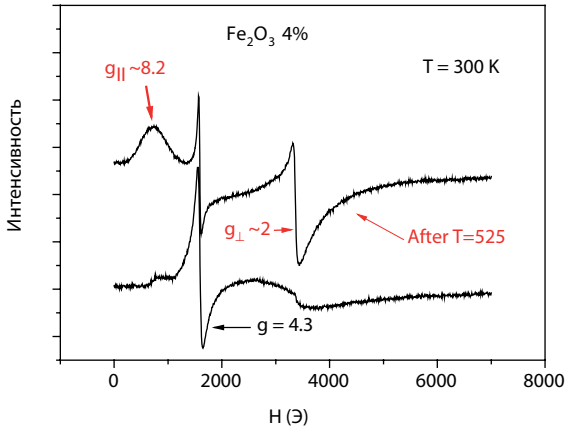


Рис. 1. Вид спектра магнитного резонанса при комнатной температуре в X-диапазоне в стёклах $25K_2O$-$25Al_2O_3$-$50B_2O_3$ (КАВ) легированных оксидом $4\%Fe_2O_3$ до отжига (I) и после отжига при 525 °C (II).

литературе [4], высказывались различные предположения, в настоящий момент пришли к выводу, что линия в спектре ЭПР с $g \sim 4.3$ обусловлена парамагнитным ионом Fe^{3+} с $S = 5/2$ в октаэдрическом окружении с максимальной степенью ромбических искажений. Вторая группа линий в образце I имеет $g_{\|} = 7.3$ и $g_{\perp} = 1.95$ с шириной 200 и 600 Ое, соответственно. Положение и ширина линий не меняются во всём температурном диапазоне, а интегральная интенсивность описывается законом Кюри ~const/T. Данные линии можно отнести к линиям кластеров, образованных ионами Fe^{3+}. Третья группа линий начинает проявляться только выше 100 К. Её эффективные g-фактора меняются в диапазоне от $g_{\|} = 2.3$ до $g_{\perp} = 2.0$. Интегральная интенсивность проходит через максимум при температуре 500 К. Мы предполагаем, что данная линия обусловлена наличием иона Fe^{2+} в стекле, что подтверждается данными мессбауэровской спектроскопии. Температурные зависимости интегральной интенсивности линий, нормированные на собственное максимальное значение в образце I приведены на рис. 2.

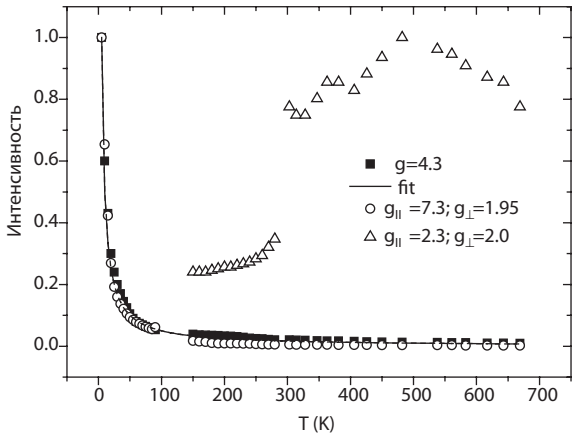


Рис. 2. Температурные зависимости интегральной интенсивности линий магнитного резонанса в КАВ + $4\%Fe_2O_3$ до отжига (образец I) отнормированные на максимальные значения.

В образце II КАВ + $4\%Fe_2O_3$ при отжиге выше температуры стеклования, образовались наночастицы железа Fe_2O_3, которые проявляются как линии ферромагнитного резонанса в спектре. Образование наночастиц железа в отожжённом стекле (образец II) также подтверждает наличием петель гистерезиса, наблюдающихся при 10, 100, 200 и 300 К, которые приведены на рис. 3б, в отличие от образца I, где данные зависимости намагниченности от внешнего магнитного поля парамагнитные (рис. 3а). При этом линии ЭПР, которые наблюдались в неотожжённом образце, в образце II также регистрируются. Часть ионов железа остаются в парамагнитном состоянии, что подтверждается наличием линии с $g = 4.3$ в спектре отожжённого образца, рис. 1. Вероятно, кластеры с $g_{\|} = 7.3$ и $g_{\perp} = 1.95$ при отжиге притягиваются и образуются ферромагнитные частицы, которые уже проявляются в спектре как линии ферромагнитного резонанса с $g_{\|} = 8.2$, $g_{\perp} = 2$.

Проведён анализ температурной зависимости спектров ЭПР отожжённого образца. Дополнительно к линиям от трёх центров, наблюдающихся в неотожжённом образце, появляется широкая линия с эффективным $g \cong 2$. Интегральная интенсивность её практически не зависит от температуры. Мы полагаем, что это линия ферромагнитного резонанса от ферромагнитных частиц гематита большого размера Fe_2O_3.

Необходимо отметить, что положение и ширина линии ЭПР парамагнитных центров Fe^{3+} (первая группа линий) в

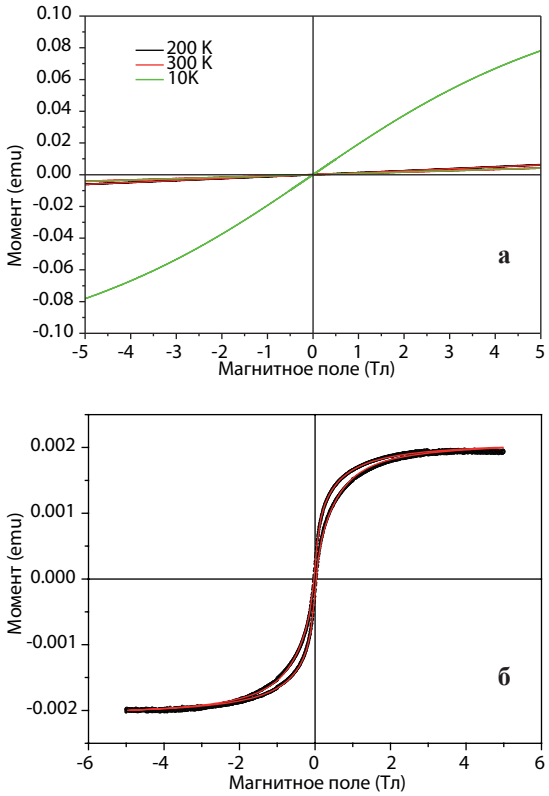


Рис. 3. Зависимость намагниченности от внешнего магнитного поля в КАВ + $4\%Fe_2O_3$ до отжига (образец I) при $T = 5$, 200 и 300 К; после отжига (образец II) при $T = 300$ К.

сильно искажённом октаэдрическом окружении практически не изменились после отжига. Интегральная интенсивность также следует закону Кюри. Вторая группа линий $g_{\parallel}$ = 7.3 и $g_{\perp}$ = 1.95, с шириной 200 и 600 Э, соответственно, имеет температурную зависимость аналогичную для образца I. Положения и ширина линий не меняются во всём температурном диапазоне, а интегральная интенсивность описывается законом Кюри. При этом на линии второй группы от кластеров в отожжённом образце накладываются линии ферромагнитной природы, с близким эффективным g-фактором, но другой шириной линии около 500 Э, интегральная интенсивность которой не зависит от температуры, что позволяет разделить эти линии в широком температурном диапазоне. Мы предполагаем, что данные линии второй группы обусловлены объединившимися в наночастицы гематита Fe_2O_3 кластерами. В процессе отжига выше температуры стеклования кластеры притягиваются друг к другу, образуя более крупные ферромагнитные частицы. Если предположить, что ферромагнитные частицы имеют лёгкую плоскость анизотропии, то, сравнивая положения линий в спектрах X- и Q-диапазона, можно оценить поле анизотропии из соотношения:

$$\left(\frac{\omega}{\gamma}\right)^2 = [H_{0z} + 2H_{A1}\cos^2\theta_0 + 2H_{A2}\sin^2\theta_0] \times [H_{0z} + 2H_{A1}\cos^2\theta_0 + 2H_{A2}\sin^2\theta_0(2\cos 2\theta_0 + 1)], \quad (1)$$

где H_{A1} и H_{A2} так называемые поля анизотропии, θ_0 характеризует равновесные значения намагниченности. Данное предположение подтверждается измерениями спектров ЭПР отожжённого (I) и неотожжённого (II) образцов при комнатной температуре в Q-диапазоне. Вид спектров образцов I и II в Q-диапазоне приведён на рис. 4. В X-диапазоне расстояние между линией второй группы $g_{\parallel}$ = 8.2 ($H_{res} \cong$ 730 Ое) и g = 2 ($H_{res} \cong$ 3400 Э) примерно 2670 Э. При переходе в Q-диапазон параллельной компоненты линии с $g_{\parallel}$ = 8.2 в спектре не регистрируется, но появляются параллельные компоненты поликристаллического спектра H_{res} ~ 10500 Э, что совпадает с рассчитанными значениями по формуле (1) для линии ферромагнитного резонанса в Q-диапазоне ~10400 Э. В спектре Q-диапазона линии первой группы не наблюдаются, что требует дальнейших исследований.

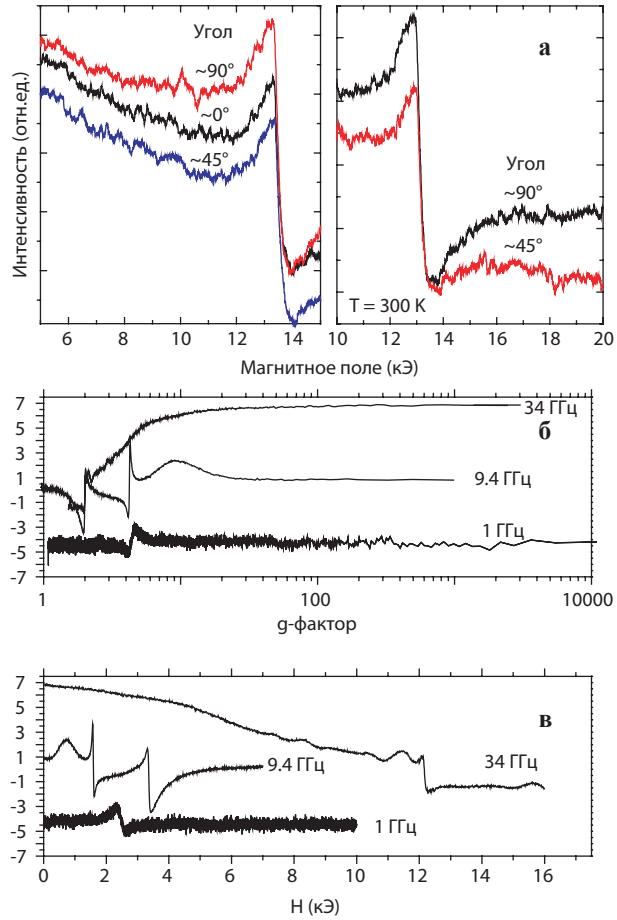


Рис. 4. Вид спектров магнитного резонанса в КАВ образце (II), зарегистрированных при комнатной температуре: **а** неотожжённый образец (I) в Q-диапазоне; **б** отожжённый образец (II) в L-, X- и Q-диапазонах, по оси абсцисс отложено значение g-фактора; **в** отожжённый образец (II) в L-, X- и Q-диапазонах, по оси абсцисс отложено значение внешнего магнитного поля.

Заключение

Проведено исследование методом магнитного резонанса магнитных свойств стекол 25%Al_2O_3-25%K_2O-50%B_2O_3, легированных 4%Fe_2O_3, до отжига и после отжига при 525 °C. Из анализа температурной зависимости положения, ширины и интегральной интенсивности линий в спектре неотожжённого образца следует, что образуются три вида парамагнитных центров. Первый центр связан с ионами трёхвалентного железа, находящимися в сильно искажённом октаэдрическом кристаллическом поле. Второй образован кластерами ионов железа, а третий обусловлен ионами двухвалентного железа. После отжига при температуре 525 °C в образце ферромагнитные кластеры перестраиваются, образуя ферромагнитные наночастицы разных размеров. От более крупных частиц наблюдаются линии ферромагнитного резонанса на g ~ 2, вторая группа частиц имеет поле анизотропии порядка 1300 Э.

Авторы благодарны М. М. Ахметову за проведение измерений спектров ЭПР отожжённого образца (II) в L-диапазоне при комнатной температуре и И. Ф. Гильмутдинову за измерения намагниченности.

Литература

1. Степанов С.А.: Физика и химия стекла **2**, 228–241 (1976)
2. Ширшнев П.С., Никоноров Н.В., Цехомский В.А.: Патент на изобретение. М.: Роспатент 2012.
3. Иванова О.С., Великанов Д.А., Диденко О.Н., Зайковский В.И.: J. Sib. Fed. Univ. Mathematics & Physics **4**(4), 470 (2011)
4. Kliava J., Edelman I., Ivanova O., Ivantsov R., Petrakovskaia E., Hennet L., Thiaudier D., Saboungi M.-L.: JMMM **323**, 451 (2011)

Влияние анионов на спин-кроссовер свойства, упаковку молекул и магнитное поведение дендримерных комплексов Fe(III) второй генерации

Н. Е. Домрачева, В. Е. Воробьёва

Отдел химической физики; лаборатория молекулярной радиоспектроскопии

Влияние анионов Cl и ClO_4 на спин-кроссовер поведение, упаковку молекул и магнитные свойства изучено методом электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) для двух новых дендримерных комплексов Fe(III) второй генерации. Результаты ЭПР показали, что соединение **1** (с анионом Cl) состоит в основном из высокоспиновых (ВС, S = 5/2) центров Fe(III) и демонстрирует переход в антиферромагнитное (АФ) упорядоченное состояние ниже 7 К. Методом ЭПР исследована спиновая динамика и выявлена роль корреляционных эффектов на сигнал ЭПР. Установлен квазидвумерный характер магнетизма в соединении **1** с цепочечной организацией спинов S = 5/2 в ионных бислоях. Показано, что АФ слои характеризуются внутрицепочечным обменом J_{intra} = 11.6 К, а величина межслоевого обменного взаимодействия равна J_{inter} ~ 0.9 К. Установлено, что обменные взаимодействия внутри цепочек полностью подавляют спин-кроссовер эффект в соединении **1**. Комплекс **2** (с анионом ClO_4) демонстрирует совершенно иное магнитное поведение. Данные ЭПР показывают, что соединение **2** содержит НС и ВС центры Fe(III), которые организованы в димеры. Выше 150 К, в соединении **2** наблюдается частичный спин-кроссовер переход (S = 5/2 ↔ 1/2), а ниже 10.2 К – переход в АФ упорядоченное состояние.

Введение

Переключаемые молекулы являются привлекательными строительными блоками для конструирования функциональных наноматериалов. Спин-кроссовер (СК) соединения – идеальные кандидаты для этих целей, поскольку могут переключать спиновые состояния за счёт внешних воздействий: температуры, давления, света или их комбинации [1–7]. Особое внимание при конструировании новых СК комплексов необходимо уделять выбору лиганда, аниона и молекулы растворителя, ибо их модификация способна полностью изменять упаковку молекул в кристаллической решётке и влиять на СК-поведение. Мотивация данной работы обусловлена двумя причинами: изучить влияние аниона на молекулярную организацию и спин-кроссовер свойства, а также сконструировать материал, в котором одновременно существовали бы спин-кроссовер эффект и магнитное упорядочение. Сочетание последних свойств позволило бы получить переключаемые магнетики, где магнитным порядком системы можно будет управлять, индуцируя СК явление за счёт света или давления. Катионные спин-кроссовер Fe(III) комплексы прекрасно подходят для этих целей, поскольку обладают спиновой (S = 5/2 ↔ 1/2) бистабильностью. Первые шаги в сочетании указанных свойств были предприняты до нас [8], где спин-кроссовер катионы железа интегрировались в 1D или 2D магнитные подрешётки других комплексов. Однако при таком подходе взаимосвязь двух различных магнитных подсистем была достаточно слабой. Мы решили конструировать функциональные материалы другим способом: окружать катионные спин-кроссовер комплексы Fe(III) дендронами. Дендримерные молекулы способны самоорганизовываться в надмолекулярные ансамбли и поэтому следует ожидать, что самоорганизация дендронов будет генерировать в системе магнитный порядок.

Результаты и обсуждения

Для реализации поставленной цели были синтезированы два дендримерных комплекса Fe(III) второй генерации, $[Fe(L_2)]^+X^-$, с анионами (X = Cl и ClO_4), схематическая модель которых представлена на рис. 1. Результаты исследования новых соединений с помощью элементного анализа, УФ, ИК, ЯМР спектроскопии и масс-спектрометрии позволили установить, что ион Fe(III) имеет октаэдрическую координацию (N_4O_2), сформированную двумя тридентатными (ONN) лигандами (L). Рентгеноструктурные данные, полученные для аналогичных соединений Fe(III) без дендронного окружения, показывают, что два тридентатных (ONN) лиганда расположены в меридиональной конфигурации (под углом 90° друг к другу). DFT расчёты, выполненные для исследуемых дендримерных комплексов Fe(III), подтвердили, что меридиональная конфигурация лигандов является энергетически более выгодной.

Температурные зависимости поведения эффективного магнитного момента для соединений **1** (Cl) и **2** (ClO_4) представлены на рис. 2a, b. Напомним, что значения $\mu_{eff,BC} = 5.91\mu_B$ и $\mu_{eff,HC} = 2.0\mu_B$ характеризуют ионы Fe(III), находящиеся в высокоспиновом (ВС) и низкоспиновом (НС) состояниях, соответственно. Используя соотношение:

$$\mu^2_{eff} = x\mu^2_{eff,HS} + (x - 1)\mu^2_{eff,LS}\ , \qquad (1)$$

где x – доля фракции ВС молекул, можно заключить, что комплекс **1** при 300 К содержит ~95% ВС и ~5%

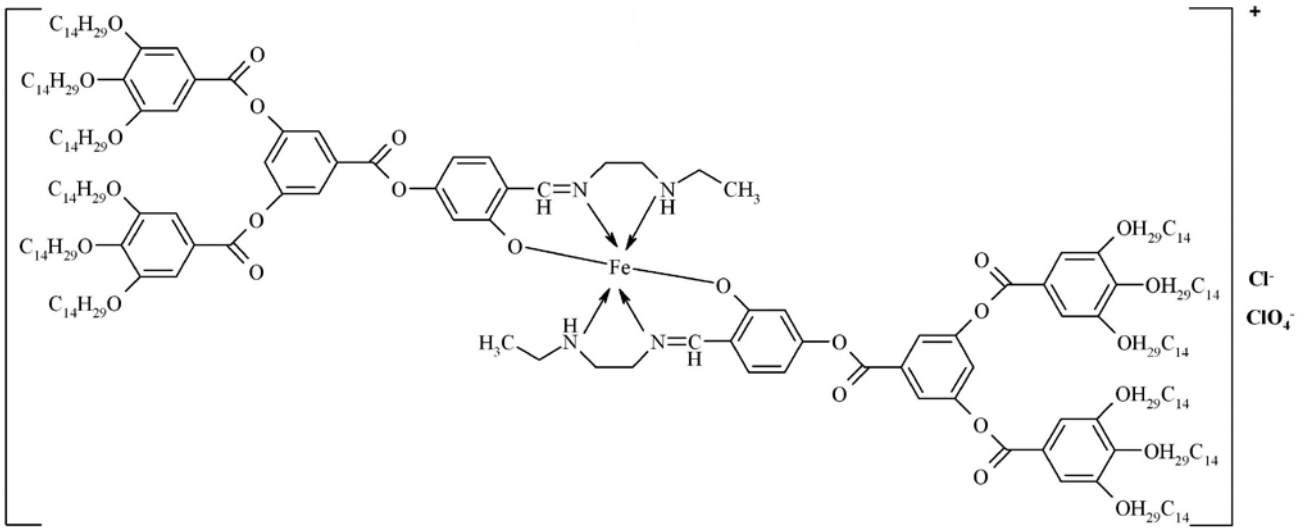


Рис. 1. Схематическая модель комплексов Fe(III) с противоионами Cl и ClO_4.

НС молекул. Построение зависимости χ^{-1} от T для **1** показывает (рис. 2c), что она описывается законом Кюри-Вейсса во всём температурном интервале с константой $\theta_1 = -17.2$ К, что указывает на наличие в системе антиферромагнитных (АФ) обменных взаимодействий и отсутствие СК перехода.

Замена аниона с Cl на ClO_4 приводит к существенным изменениям в поведении эффективного магнитного

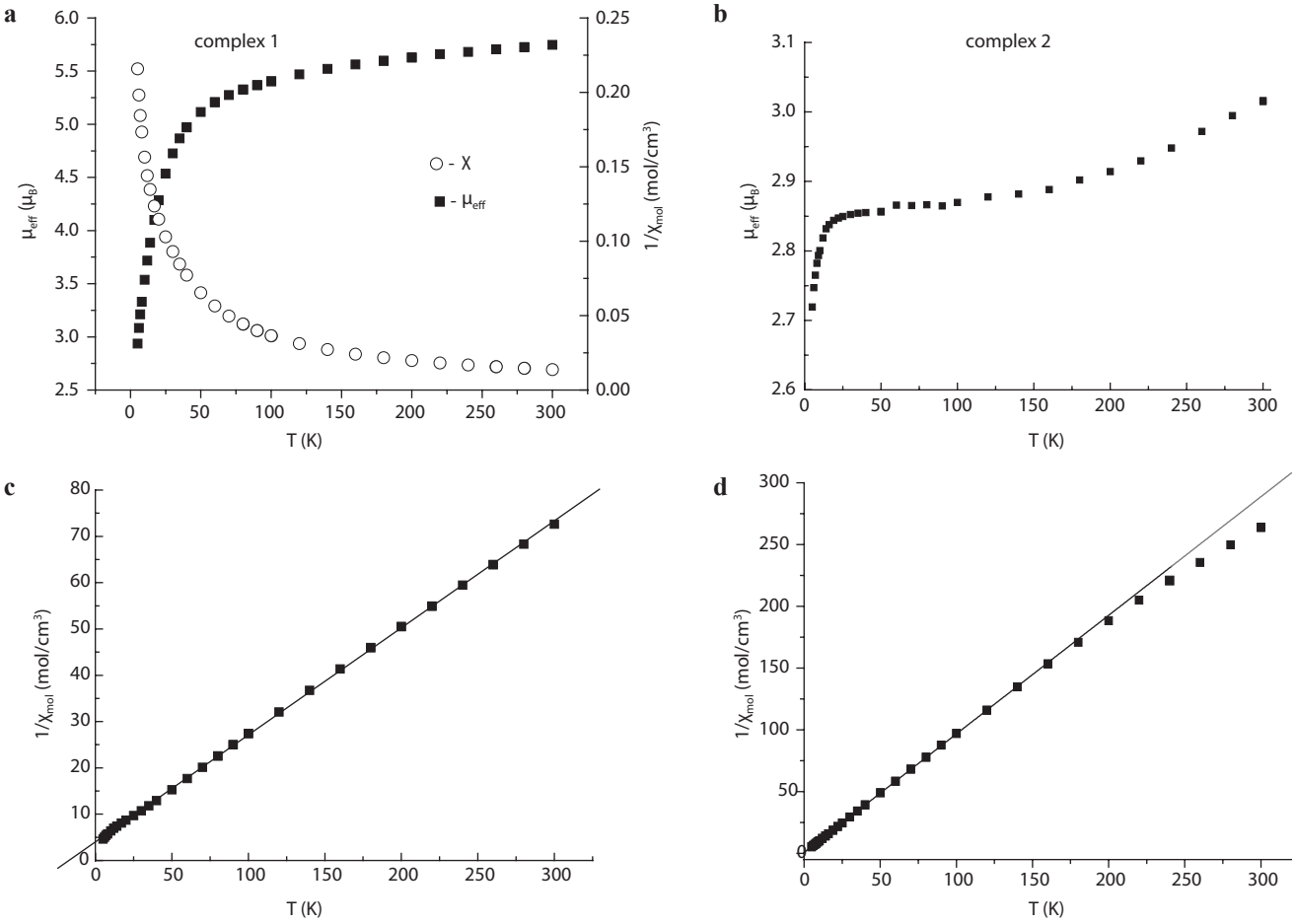


Рис. 2. Температурная зависимость μ_{eff} (**a**, **b**) и χ^{-1} (**c**, **d**) для комплексов **1** и **2**, соответственно.

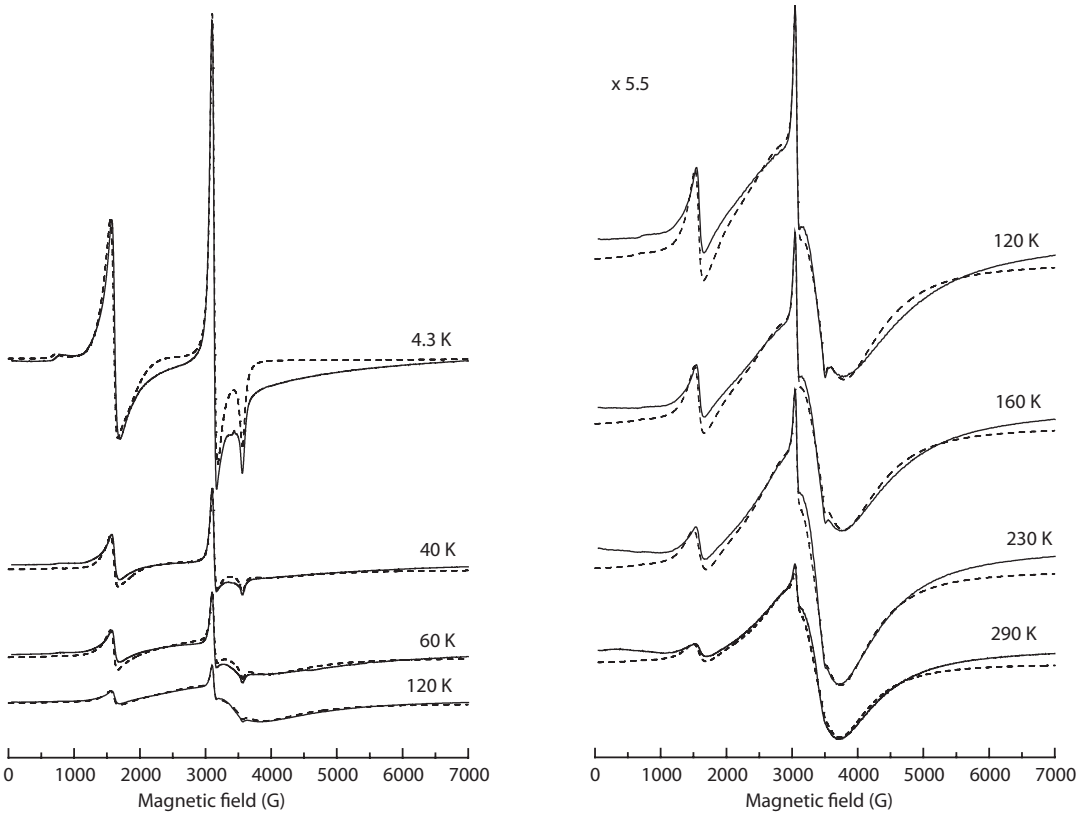


Рис. 3. Температурная зависимость спектров ЭПР соединения **1** с противоионом Cl. Штриховые линии показывают теоретические спектры ЭПР. Спектры в температурном интервале (120–290 К) записаны при большем усилении (×5.5) по сравнению со спектрами в температурном интервале (4.3–120 К).

момента (рис. 2b). Согласно соотношению (1), комплекс **2** при 300 К содержит ~83% НС и ~17% ВС молекул. Построение зависимости χ^{-1} от T для **2** (рис. 2d) показывает, что она подчиняется закону Кюри-Вейсса в низкотемпературной области с константой $\theta_2 = -3.8$ К, а выше 150 К отклоняется от линейного закона, поскольку в системе происходит частичный СК переход.

ЭПР является прямым методом, который позволяет детально отслеживать вариацию спиновых фракций с температурой. Спектры ЭПР (X-диапазон, $h\nu = 0.3$ см$^{-1}$) для комплекса **1** при различных температурах (4.2–300 К) представлены на рис. 3. Видно, что в спектрах наблюдаются три различных типа сигналов. Сигнал в низких полях с $g_{eff} = 4.2$ обусловлен ВС ($S = 5/2$) центрами Fe(III), характеризуемыми параметрами тонкой структуры ($D > h\nu = 0.3$ см$^{-1}$, $E/D = 1/3$) и сильным ромбическим искажением кристаллического поля на ионе (I-тип ВС центров). Широкая линия с $g_{eff} \sim 2$ соответствует ВС ионам Fe(III) II-типа и демонстрирует интересные особенности, которые будут рассмотрены далее. Анизотропный сигнал с $g_{\perp} = 2.21$ и $g_{\parallel} = 1.93$ обусловлен НС ($S = 1/2$) центрам Fe(III).

Магнитное поведение комплекса **1**, представленное температурной зависимостью интегральной интенсивности линий спектра ЭПР (I), показано на рис. 4a. Видно, что в этой зависимости можно выделить две температурные области: наблюдение резкого максимума при 7 К в низкотемпературной (4.2–40 К) области и широкого максимума при $T_{мак} \sim 100$ К в высокотемпературной. Чтобы понять природу аномального поведения I, были рассчитаны температурные зависимости спектров ЭПР для каждого типа магнитных центров раздельно, которые представлены на рис. 4b–d. Анализ спектров ЭПР для каждого типа центров Fe(III) производился на основе моделирования спектров с использованием программы EasySpin. Как видно, зависимости I_{LS} и I_{HS_I} демонстрируют резкий максимум при $T_N = 7$ К в первом температурном интервале (рис. 4b, d). Появление максимума на кривых I_{LS} и I_{HS_I} обусловлено АФ обменными взаимодействиями. Выше 7 К температурные зависимости I_{LS} и I_{HS_I} описываются законом Кюри-Вейсса и интенсивности линий монотонно спадают с ростом температуры. Температурная зависимость (I_{HS_II}) широкой линии, обязанной ВС центрам Fe(III) II-типа, ведёт себя совершенно иным образом (рис. 4c) и демонстрирует широкий максимум при 100 К в высокотемпературной области.

Согласно соотношению интегральных интенсивностей сигналов ЭПР при 100 К, число ВС центров II-типа составляет ~94%, в то время как число ВС центров I-типа и НС центров порядка 4.3% и 1.7%, соответственно. Таким образом, комплекс **1** состоит в основном из ВС центров II-типа. Литературные данные [9] свидетельствуют, что

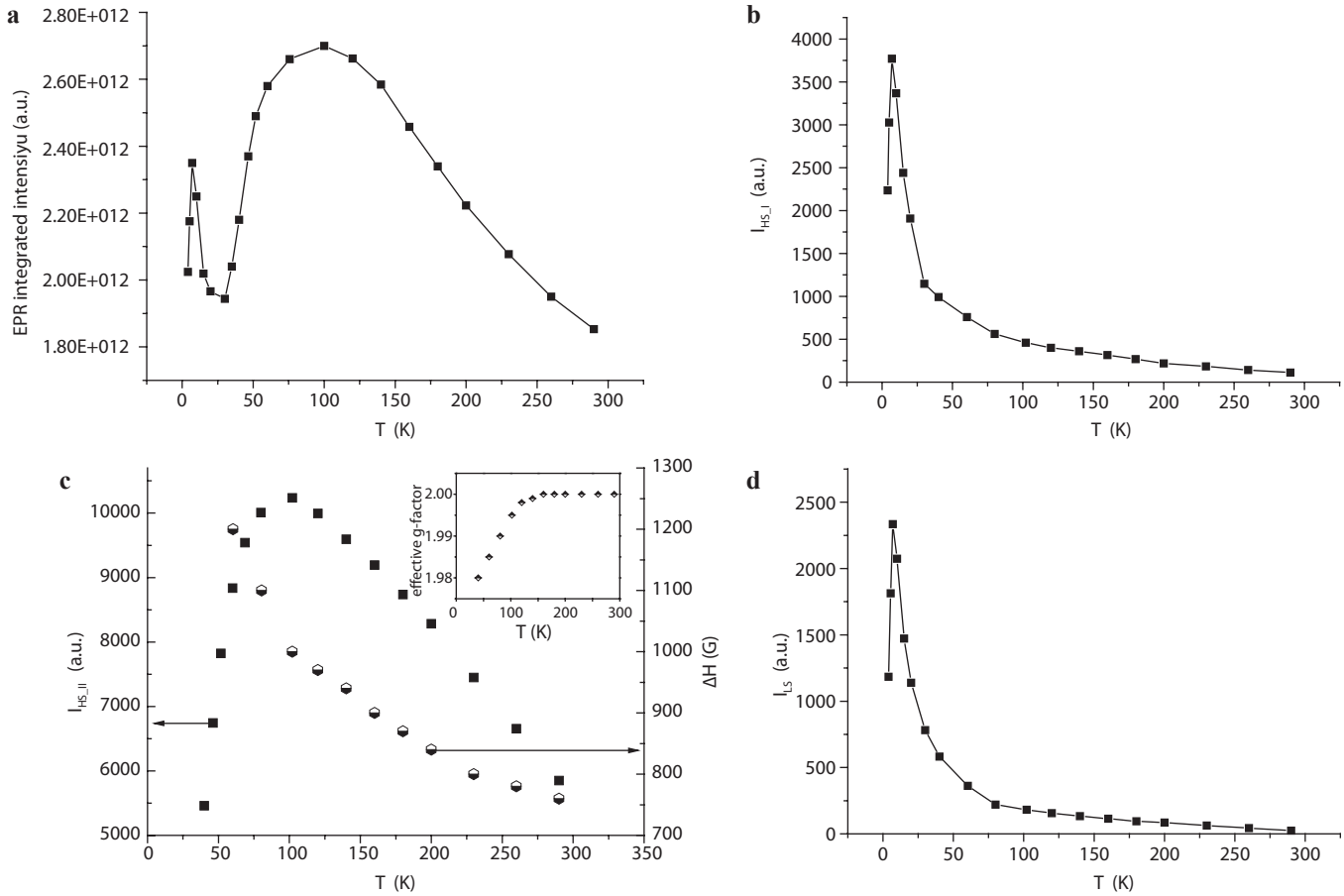


Рис. 4. Температурная зависимость интегральной интенсивности всего спектра ЭПР (**a**), I-го типа ВС центров Fe(III) (**b**), II-го типа ВС центров Fe(III) (**c**) и НС центров Fe(III) (**d**) для соединения **1**.

наблюдение широкого максимума в температурной зависимости магнитной восприимчивости и интегральной интенсивности линий ЭПР обусловлено формированием ближнего магнитного порядка и его появление является доказательством низкоразмерности (1D, 2D) магнитной системы. В рамках таких воззрений, мы можем предположить, что широкая линия (обязанная ВС центрам Fe(III) II-типа) соответствует сигналу от низкоразмерной (1D, 2D) АФ магнитной системы. Тогда широкий максимум при 100 К в температурной зависимости I_{HS_II} от T отвечает за формирование режима ближних магнитных корреляций [9]. Сигнал ЭПР от этой линии далее с уменьшением температуры полностью исчезает, что свидетельствует об установлении дальнего магнитного порядка (T_N = 7 К). Сдвиг g-фактора (см. вставку на рис. 4c) при приближении к температуре Нееля сверху характеризует растущую роль корреляций ближнего порядка. А уширение линии ЭПР (см. рис. 4c) при приближении к температуре магнитного упорядочения сверху трактуется как критическое уширение линии поглощения, обусловленное “замедлением” спиновых флуктуаций при приближении к критической температуре [10–12].

Теория критического уширения линии ЭПР была развита в работах [10–12] и использована для объяснения поведения $\Delta H(T)$ в антиферромагнетиках в окрестностях температуры Нееля. В рамках этой модели наблюдаемое увеличение ширины линии описывается следующей формулой [9]:

$$\Delta H(T) = \Delta H^* + A\left[\frac{T_N^{EPR}}{T - T_N^{EPR}}\right]^{\beta}, \qquad (2)$$

где первый член ΔH^* описывает высокотемпературный предел ширины, который является температурно-независимым, второй член отвечает за критическое поведение при приближении сверху к температуре магнитного упорядочения, T_N^{EPR}, β – критическая экспонента. В рамках данной теории критический показатель β равен 3/2 и 7/4 для двумерной (2D) и одномерной (1D) системы, соответственно. Анализ температурной зависимости $\Delta H(T)$ в рамках теории критического уширения линии поглощения по формуле (2) позволяет удовлетворительно описать экспериментальные данные значением критической экспоненты β = 1.5 (рис. 5a).

Таким образом, соединение **1** можно рассматривать с магнитной точки зрения как квазидвумерный антиферромагнетик (АФ), где ВС катионные (S = 5/2) комплексы

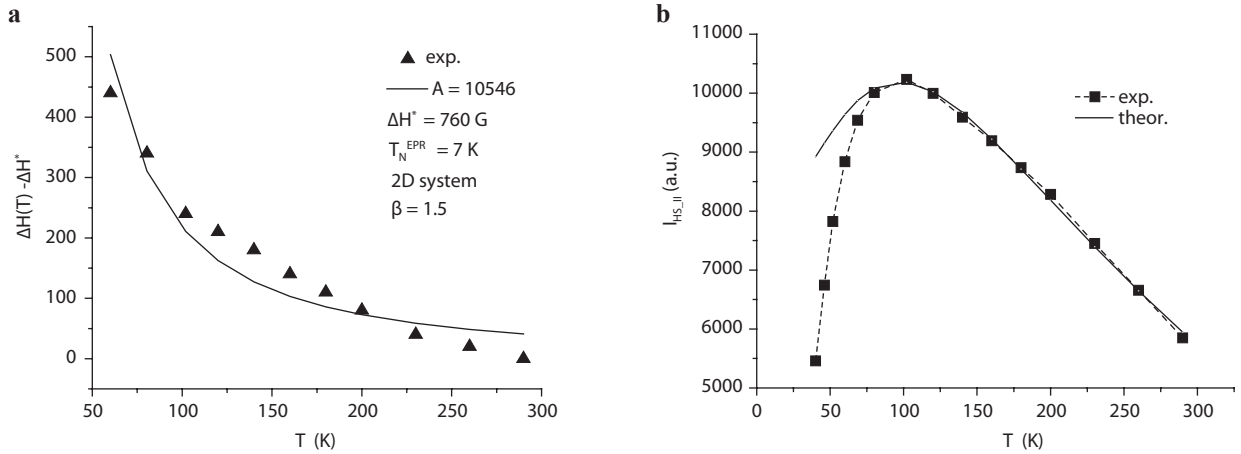


Рис. 5. Температурная зависимость ширины широкой линии ЭПР (**a**). Сплошная линия – теоретическая зависимость, полученная согласно выражению (2) с показателем β = 1.5. Температурная зависимость I_{HS_II} от T для соединения **1** (**b**). Сплошная линия – теоретическая зависимость, полученная согласно выражению (4).

железа, организованные в цепочку, образуют ионные бислои, в которых соседние катионы железа упакованы “голова к голове” и связаны водородными связями между аминными группами лиганда и анионами Cl (рис. 6). При этом объёмные дендронные заместители хорошо изолируют ионные бислои друг от друга. Такая молекулярная организация центров Fe(III) была предложена в нашей предшествующей работе [13] на основании DFT-расчётов и рентгеноструктурных данных, полученных для аналогичного соединения без дендронного окружения. Таким образом, АФ цепочки спинов $S = 5/2$ определяют магнитное поведение соединения **1** в высокотемпературной области и обуславливают появление корреляционного максимума на зависимости I_{BC_II} от T.

В случае АФ Гейзенберговской ($S = 5/2$) цепочки по положению максимума на магнитной восприимчивости (и интегральной интенсивности линий ЭПР) можно качественно оценить параметр обменного взаимодействия J_{intra} внутри цепочки согласно выражению:

$$k_B(T(\chi_{max}))/|J_{intra}| = 10.6 \ . \qquad (3)$$

Оценка даёт значение $J_{intra} \approx 9.4$ К.

Более точную оценку можно получить, используя модель бесконечной Гейзенберговской цепочки с $S = 5/2$. Для этой цели экспериментальные данные были рассчитаны согласно уравнению (4):

$$\chi = \frac{NS(S+1)g^2\mu_B^2}{3kT} \cdot \frac{1+u(K)}{1-u(K)}, \qquad (4)$$

где $u(K) = \coth(K - 1)/K$, $K = -2JS(S + 1)/kT$.

Как видно (рис. 5b), наилучшее согласие с экспериментальными данными получается при величине обменного взаимодействия внутри цепочки равного $J_{intra} = 11.6$ К. Согласие в низкотемпературной области (ниже 80 К) не является удовлетворительным, что, вероятно, обусловлено наличием межцепочечных взаимодействий.

Сравнение температурных зависимостей статической магнитной восприимчивости (рис. 2a) и интегральной интенсивности линий спектра ЭПР ВС центров II-типа (рис. 4c) демонстрирует существенное различие в их поведении. Это различие объясняется тем, что спектры ЭПР способны регистрировать поведение динамических спинов. Динамические спины (характеризующие ближний магнитный порядок) детектируются только в короткой временной шкале ($\tau = 1/\nu \sim 10^{-10}$ с) и не могут быть обнаружены с помощью статических магнитных измерений ($\tau \sim 100$ с). Результаты данной работы наглядно показывают, что в роли динамических спинов выступают антиферромагнитные корреляции ближнего порядка.

На основании изложенных результатов, была предложена следующая молекулярная организация в комплексе **1**, где $[Fe^{III}(L)_2]^+$ катионы железа организованы в цепочки за счёт водородных связей и образуют ионные бислои (рис. 6).

Рассмотрим ЭПР результаты, полученные для соединения **2**. На рис. 7 представлены спектры ЭПР поликри-

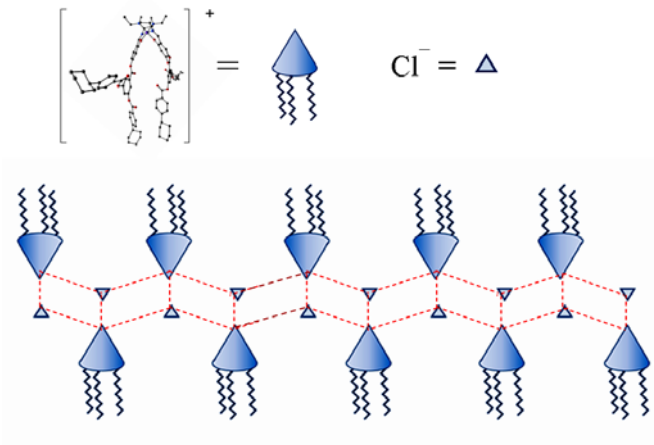


Рис. 6. Предполагаемая упаковка катионов $[Fe^{III}(L)_2]^+$ в соединении **1**.

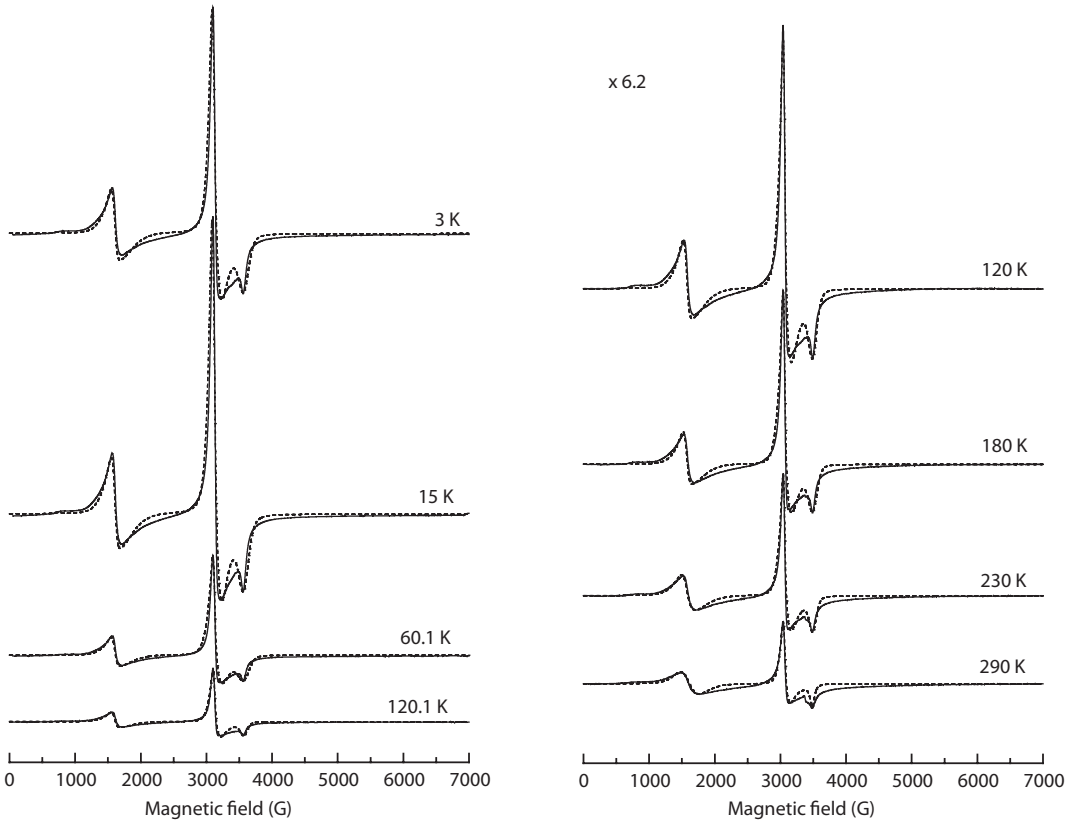


Рис. 7. Температурная зависимость спектров ЭПР для соединения **2** с противоионом ClO_4. Штриховые линии – теоретические спектры. Спектры в температурном интервале (120–290 К) записаны при большем усилении (×6.2) по сравнению со спектрами в низкотемпературном интервале (3–120.1 К).

сталлического образца с вариацией температуры. Видно, что в спектрах наблюдаются только два типа сигналов: НС центры с g-факторами: $g_{\perp}$ = 2.21, $g_{\parallel}$ = 1.93 и ВС центры, характеризуемые магнитными параметрами: g = 2.0, D = 0.42 см$^{-1}$, E = 0.1 см$^{-1}$. Пунктирными линиями показаны теоретические спектры ЭПР, рассчитанные с помощью программы EasySpin.

Магнитное поведение соединения **2**, представленное температурной зависимостью интегральной интенсивности линий ЭПР (I) и произведения $I \cdot T$ приведено на рис. 8. Видно, что зависимость I от T демонстрирует максимум при 10.2 К, а затем монотонно спадает. Температурное поведение произведения $I \cdot T$ подобно при этом температурной зависимости эффективного магнитного

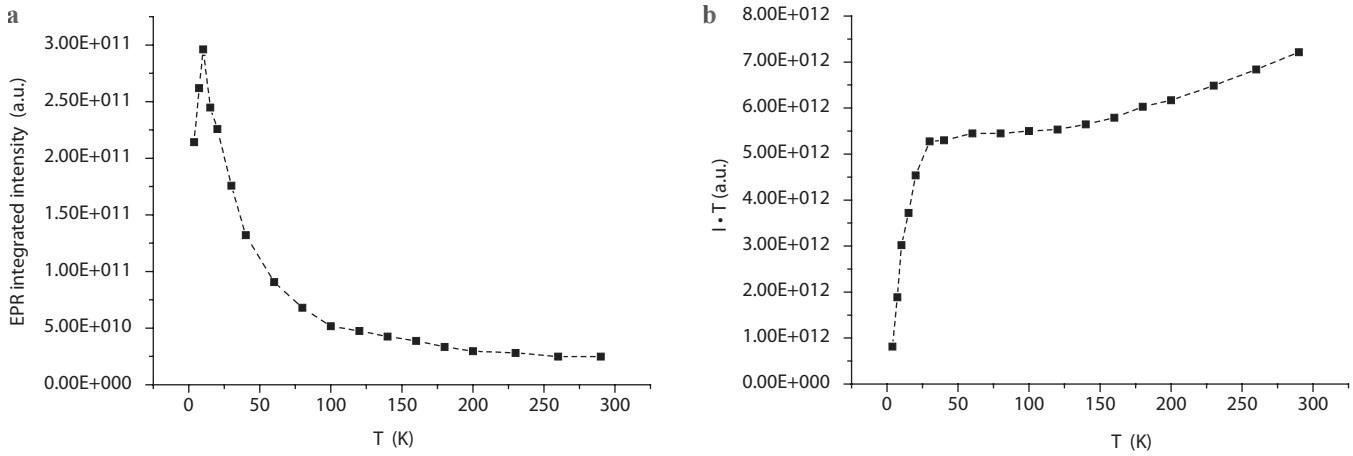


Рис. 8. Температурная зависимость интегральной интенсивности линий спектра ЭПР (I) для комплекса **2** (**a**) и произведения $I \cdot T$ (**b**).

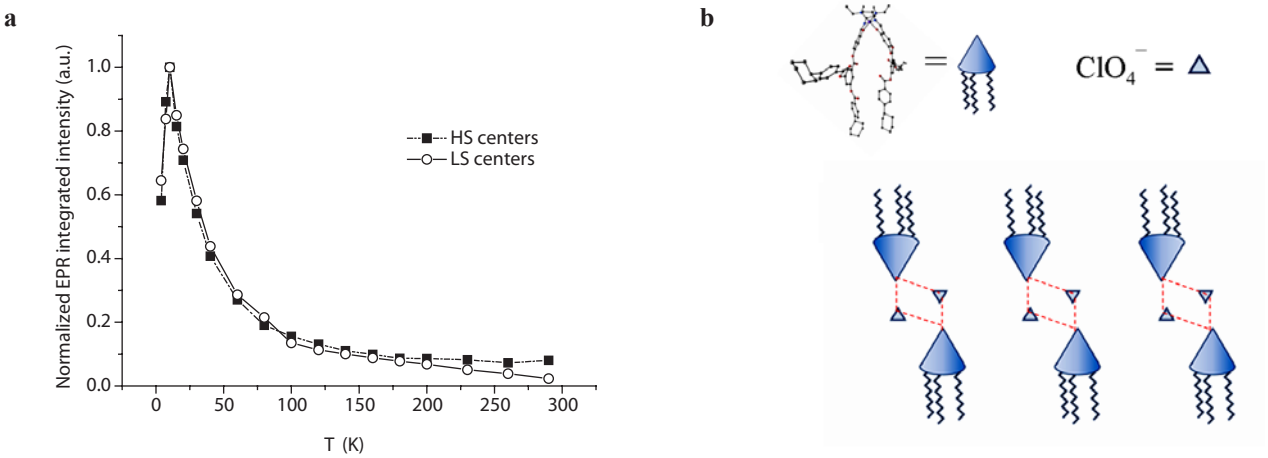


Рис. 9. a Температурная зависимость интегральных интенсивностей линий спектра ЭПР для НС и ВС центров, нормированных на единицу. **b** Предполагаемая упаковка катионов $[Fe^{III}(L)_2]^+$ с противоионами ClO_4 в комплексе **2**.

момента (μ_{eff}) (рис. 2b): регистрируется резкий спад ниже 30 К, затем практически плато между 30 и 150 К и далее постепенный рост выше 150 К.

С целью выяснения причин такого поведения, были рассчитаны температурные зависимости интегральной интенсивности линий ЭПР для каждого типа центров раздельно. Зависимости I_{BC} и I_{HC} (рис. 9a) имеют резкий максимум при T_N = 10.2 К, выше T_N они подчиняются закону Кюри-Вейсса вплоть до 150 К, а при дальнейшем росте температуры отклоняются от этого закона.

Появление максимума на кривых указывает, что НС и ВС центры железа связаны антиферромагнитным (АФ) обменным взаимодействием. Если наложить кривые I_{BC} и I_{HC} друг на друга, то наблюдается одинаковое магнитное поведение ВС и НС центров до T = 150 К. Этот факт говорит о том, что катионы Fe(III) в соединении **2** организованы в димеры. Выше 150 К, температурные зависимости I_{BC} и I_{HC} отклоняются от закона Кюри-Вейсса: число ВС центров растёт, а число НС-центров падает. Такое поведение указывает, что в температурном интервале 150–300 К наблюдается частичный СК переход. На основании изложенных данных, была предложена следующая структурная организация молекул в комплексе **2** (рис. 9b).

Предложенные упаковки катионов Fe(III) в соединениях **1** и **2** на основании данных ЭПР подтверждаются DFT-расчётами. Расчёты показывают, что перхлорат (ClO_4) анион образует более сильные водородные связи с аминными протонами лиганда, но увеличение размера аниона способствует образованию димерных структур. Более маленький по размеру анион хлора (Cl) [14] благоприятствует более близкой упаковке катионов Fe(III) с организацией их в цепочку. Известно также, что небольшой по размеру анион, как правило, стабилизирует ВС состояние, однако обменные взаимодействия внутри цепочки J_{intra} = 11.6 К полностью подавляют спиновый переход и поэтому он не наблюдается в соединении **1**.

Заключение

Магнитные свойства и влияние анионов Cl и ClO_4 на спин-кроссовер поведение и упаковку молекул исследованы методом электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) и магнитной восприимчивости для двух новых дендримерных комплексов Fe(III) второй генерации. Результаты ЭПР показали, что соединение **1** (с анионом Cl) состоит в основном из высокоспиновых (ВС, S = 5/2) молекул и демонстрирует антиферромагнитное упорядочение ниже 7 К. Интегральная интенсивность линии спектра ЭПР, соответствующая ВС центрам железа(III), проходит через широкий максимум при T_{max} = 100 К, что свидетельствует о формировании ближнего магнитного порядка и низкоразмерном характере магнетизма. Аномальное уширение линии (при приближении к температуре Нееля сверху) описывается критическим показателем β = 1.5, что указывает на квазидвумерную антиферромагнитную природу магнетизма в соединении **1**. Однако обменные взаимодействия внутри цепочек (J_{intra} = 11.6 К) полностью подавляют спин-кроссовер переход в соединении **1**.

Комплекс **2** (с анионом ClO_4) имеет совершенно иное магнитное поведение. Данные ЭПР показывают, что соединение **2** содержит около 77% НС и 23% ВС центров Fe(III). Выше 150 К в соединении наблюдается частичный спиновый переход (S = 5/2 ↔ 1/2), а ниже 10.2 К – антиферромагнитное упорядочение.

Полученные результаты и DFT-расчёты позволили сделать вывод, что соединение **1** является квазидвумерным антиферромагнетиком, где ВС катионы железа, упакованные в цепочку, образуют ионные бислои, тогда как в соединении **2** катионы Fe(III) организованы в димеры.

Таким образом, размер аниона и способность аниона создавать эффективную сетку водородных связей позволяют управлять магнитными межмолекулярными взаимодействиями и СК свойствами соединений и определяют мотив упаковки катионов Fe(III).

Работа выполнена совместно с соавторами: М. С. Груздевым, У. В. Червоновой, А. М. Колкером (Институт химии растворов РАН, синтез и характеристика соединений), Е. М. Зуевой (Казанский научно-исследовательский университет, проведение квантово-химических расчётов), В. И. Овчаренко, А. С. Богомяковым (Институт “Международный томографический центр” СО РАН, проведение измерений магнитной восприимчивости).

Литература

1. Halcrow M.A. (ed.): Spin-Crossover Materials: Properties and Applications. Chicheser: John Wiley & Sons, Ltd. 2013.
2. Gütlich P., Gaspar A.B., Garcia Y.: Beilstein J. Org. Chem. **9**, 342–391, (2013)
3. Gütlich P., Goodwin H.A.: Top. Curr. Chem. **233**, 1–47 (2004)
4. Hauser A.: Top. Curr. Chem. **234**, 155–198 (2004)
5. Ksenofontov V., Gaspar A.B., Gütlich P.: Top. Curr. Chem. **235**, 23–64 (2004)
6. Letard J.-F.: J. Mater. Chem. **16**, 2550–2559 (2006)
7. Cannizzo A., Milne C.J., Consani C., Gawelda W., Bressler C., Van Mourik F., Chergui M.: Coord. Chem. Rev. **254**, 2677–2686 (2010)
8. Janiak C.: Dalton Trans. 2781–2804 (2003)
9. Berdonosov P.S., Kuznetsova E.S., Dolgikh V.A., Sobolev A.V., Presniakov I.A., Olenev A.V., Rahaman B., Saha-Dasgupta T., Zakharov K.V., Zvereva E.A., Volkova O.S., Vasiliev A.N.: Inorg. Chem. **53**, 5830–5838 (2014)
10. Huber D.L.: Phys. Rev. B **6**, 3180–3186 (1972)
11. Kawasaki K.: Prog. Theor. Phys. **39**, 285–311 (1968)
12. Mori H., Kawasaki K.: Prog. Theor. Phys. **28**, 971–987 (1962)
13. Домрачева Н.Е., Воробьёва В.Е.: Казанский физико-технический институт им. Е. К. Завойского 2015. Ежегодник. Казань: КФТИ КазНЦ РАН 2016. с. 107–113.
14. Yamada M., Ooidemizu M., Ikuta Y., Osa S., Matsumoto N., Iijima S., Kojima M., Dahan F., Tuchagues J.-P.: Inorg. Chem. **42**, 8406–8416 (2003)

ЭПР поиск квантового поведения γ-Fe_2O_3 наночастиц, инкапсулированных в дендримерную матрицу

Н. Е. Домрачева, В. Е. Воробьёва

Отдел химической физики; лаборатория молекулярной радиоспектроскопии

Методом электронного магнитного резонанса (ЭМР) исследованы однодоменные γ-Fe_2O_3 наночастицы, инкапсулированные в дендримерную марицу, с целью обнаружения квантового поведения наночастиц. ЭМР измерения были проведены для параллельной и перпендикулярной конфигураций постоянного (H_0) и переменного (H_1) магнитного поля при различных температурах. Показано, что модель, основанная на значении спина S = 30, соответствующего суммарному магнитному моменту наночастицы, и параметр тонкой структуры D = 40 МГц могут быть использованы для интерпретации спектров ЭМР, что служит доказательством квантового поведения наночастиц.

Введение

В последнее время интерес к изучению наномасштабных магнитных систем значительно возрос, что вызвано как широким технологическим применением таких систем (катализ [1], хранение информации [2], спинтроника [3], МРТ [4], магнитные жидкости [5], биомедицина [6, 7]), так и фундаментальным научным интересом [8, 9]. В мире магнитных наносистем можно выделить два класса таких объектов: магнитные наночастицы (НЧ) и молекулярные магнетики (ММ). Известно, что поведение ММ описывается квантовой механикой, где вычисления начинаются с рассмотрения поведения одного иона, а поведение НЧ описывается в терминах классической физики на основе параметров, полученных для объёмных материалов. Представлялось интересным разработать общий подход к рассмотрению наноразмерных магнитных систем, который позволил бы лучше понять их свойства. Электронный парамагнитный резонанс (ЭПР) является отличным инструментом для демонстрации сходства в поведении НЧ и ММ, и его использование может обеспечить экспериментальные доказательства квантового поведения малых (однодоменных) НЧ. Некоторые свидетельства в пользу дискретной природы спиновых уровней НЧ уже известны в литературе. Например, в спектрах ЭМР НЧ помимо основного сигнала наблюдается малый по интенсивности сигнал в половинных полях (~1500 Гс), который, по мнению ряда авторов [10], приписывается запрещённым переходами между состояниями с $\Delta m = \pm 2$. Появление данного сигнала интерпретируется как доказательство квантовой природы системы, и при таком подходе НЧ рассматривается как гигантский обменно-связанный кластер с полным спином S.

Мотивация данной работы заключалась в том, чтобы методом ЭПР найти новые факты в пользу квантового подхода для интерпретации магнитных свойств НЧ. Для этих целей мы решили использовать методику, предложенную в работе [11] – записывать спектры ЭМР НЧ для обеих конфигураций магнитного поля, когда высокочастотное магнитное поле H_1 направлено перпендикулярно и параллельно постоянному внешнему полю H_0. Эти альтернативные конфигурации имеют разные правила отбора для разрешённых переходов между суммарными проекциями спина и поэтому дают возможность “нащупать” квантовый характер системы.

Результаты и обсуждение

Для реализации поставленной цели было исследовано магнитное поведение однодоменных γ-Fe_2O_3 НЧ, инкапсулированных в поли(пропилен иминовый) дендример второй генерации (рис. 1). В нашей предыдущей статье [12] мы уже изучали данную систему, используя классический теоретический подход, разработанный Ю. Л. Райхером и В. И. Степановым [13].

Типичные спектры ЭМР для ($H_1 \perp H_0$) конфигурации представлены на рис. 2. Видно, что наблюдается один основной сигнал с g-фактором ~ 2, резонансное положение которого смещается в область низких магнитных полей и который уширяется с понижением температуры. Температурная зависимость сдвига резонансной линии, $H_{res} - H_0$, описывается следующим выражением:

$$H_{res} - H_0 = h_a(1/L(\xi) - 3/\xi) ,$$

где h_a – анизотропное поле НЧ, $\xi = MVH_0/k_BT$, V – объём, M – намагниченность НЧ, k_B – константа Больцмана, T – абсолютная температура, H_0 = 3342 Гс и $L(\xi) = (\coth\xi - 1/\xi)$ – функция Ланжевена. Наилучшее согласие экспериментальных данных с теоретической зависимостью (рис. 3) [12] получается для значения анизотропного поля h_a = – 1375 Гс.

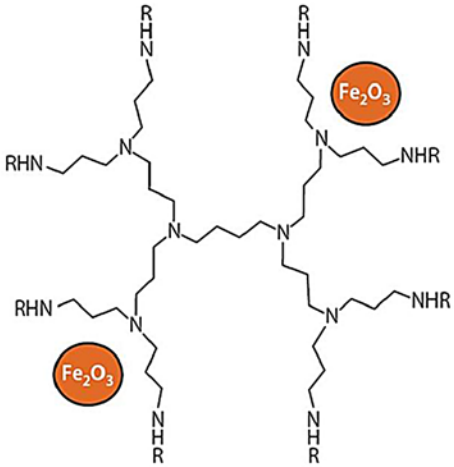


Рис. 1. Модель локализации НЧ оксида железа в структуре ППИ дендримера второй степени генерации.

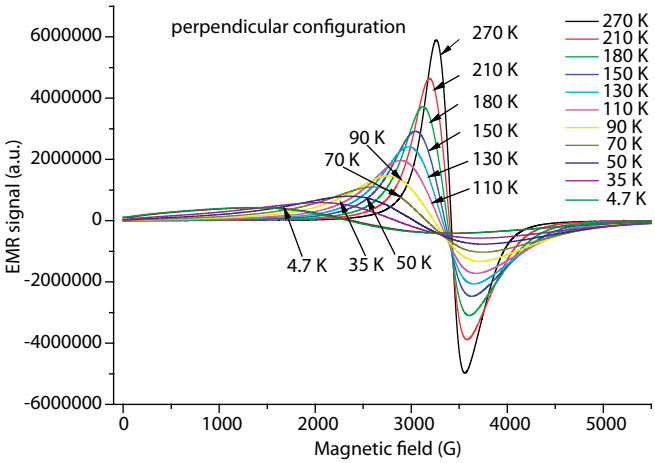


Рис. 2. Температурная зависимость спектров ЭМР γ-Fe_2O_3 НЧ в дендримере, записанная в X-диапазоне для перпендикулярной конфигурации (ν = 9.64 ГГц).

Кроме этого, для данной системы были выполнены магнитные измерения с помощью СКВИД-магнитометра (рис. 4) в двух режимах охлаждения образца: в присутствии (field cooling, FC) и отсутствии магнитного поля (zero-field cooling, ZFC). Они показали [14], что в системе наблюдается переход ансамбля НЧ из суперпарамагнитного в ферримагнитное состояние и величина эффективного магнитного момента НЧ равна $\mu_{eff} \sim 60\mu_B$.

Как говорилось ранее, помимо основного сигнала ($g \sim 2$), спектры ЭМР демонстрируют наличие небольшого сигнала в половинном поле около 1500 Гс (рис. 5), который в литературе был отнесён к запрещённым переходам между состояниями с $\Delta m = \pm 2$, где m – ожидаемое значение S_z и S – полный спин НЧ. Если, эта интерпретация верна, то интенсивность этого малого сигнала должна увеличиваться, когда спектры ЭМР будут записываться в параллельной конфигурации ($H_1 \parallel H_0$). Эксперименты ЭМР, проведённые нами для данной конфигурации (рис. 6), подтвердили, что это действительно так, и интенсивность переходов в половинном поле действительно возрастает. Таким образом, видно, что использованный нами подход открывает дополнительные возможности для анализа свойств магнитных наночастиц, где каждая НЧ рассматривается как квантовый объект с большим спином, аналогично подходу успешно применяемому для ММ.

Значит, можно использовать следующий спин-гамильтониан для расчёта спектров ЭМР:

$$H = \mu_B \hat{S} \cdot \hat{g} \cdot \hat{H} + \hat{S} \cdot \hat{D} \cdot \hat{S} \,, \qquad (1)$$

где первое слагаемое даёт расщепление энергетических уровней во внешнем магнитном поле H, а второе слагаемое определяет тонкую структуру уровней НЧ со спином S.

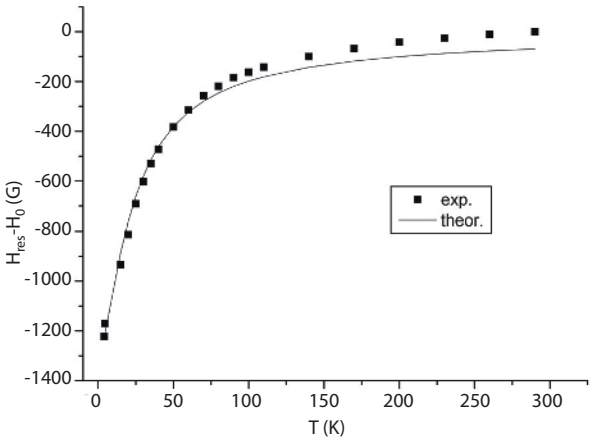


Рис. 3. Температурная зависимость сдвига резонансной линии НЧ оксида железа. Сплошной кривой показана теоретическая зависимость.

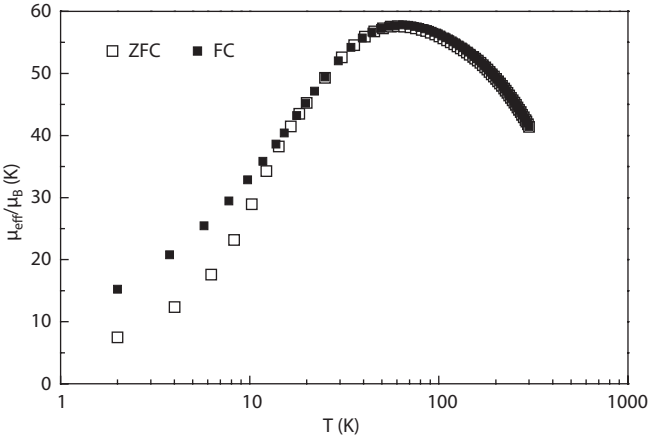


Рис. 4. Температурная зависимость эффективного магнитного момента γ-Fe_2O_3 НЧ измеренная при 100 Гс в ZFC- и FC-режимах.

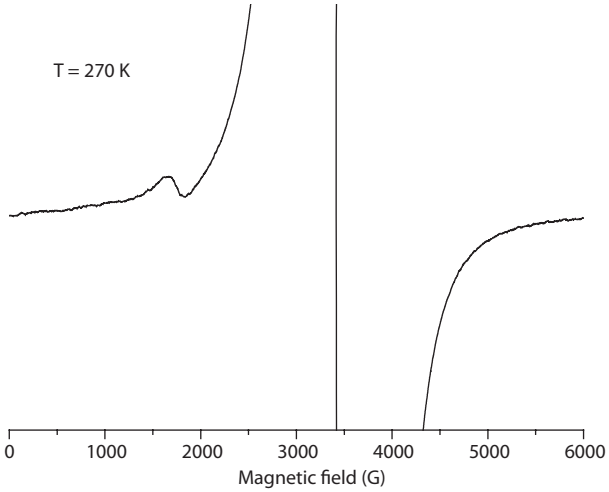


Рис. 5. Спектр ЭМР НЧ γ-Fe_2O_3 в дендримере при 270 К, демонстрирующий при большом усилении маленький сигнал в половинном поле (~1500 Гс).

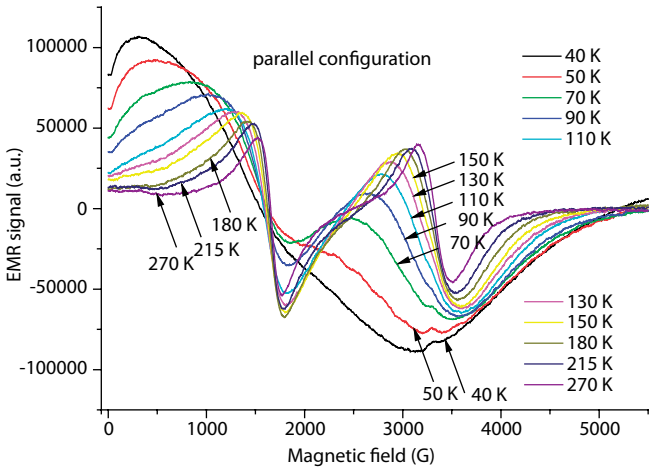


Рис. 6. Температурная зависимость спектров ЭМР γ-Fe_2O_3 НЧ в дендримере, записанная в X-диапазоне для параллельной конфигурации (ν = 9.39 ГГц).

Значение спина S для НЧ оценивалось из магнитных измерений согласно выражению $S = \mu_{eff}/g\mu_B$ [11] и в нашем случае $S \approx 30$.

Используя соотношение $D = -\gamma h_a/2S$ [11] вместе с известным значением анизотропного поля (h_a) и значением спина S, можно получить оценочное значение параметра тонкой структуры D для НЧ, которое приблизительно равно $D \sim 64$ МГц.

Моделирование спектров ЭМР для обеих конфигураций магнитного поля проводилось с помощью программы EasySpin (версия 5.1.5 [15]) с использованием метода диагонализации матрицы. Экспериментальные и теоретические спектры при T = 180 К показаны на рис. 7. Наилучшее согласие экспериментальных и теоретических спектров было получено для следующих параметров: S = 30, D = 40 МГц, где использовалась лоренцева форма линии с шириной ΔH = 220 Гс. Видно, что достаточно хорошее качественное согласие наблюдается между спектрами.

Заключение

Таким образом, полученные результаты показывают, что магнитные свойства НЧ можно анализировать с использованием большого значения спина S = 30 и параметра

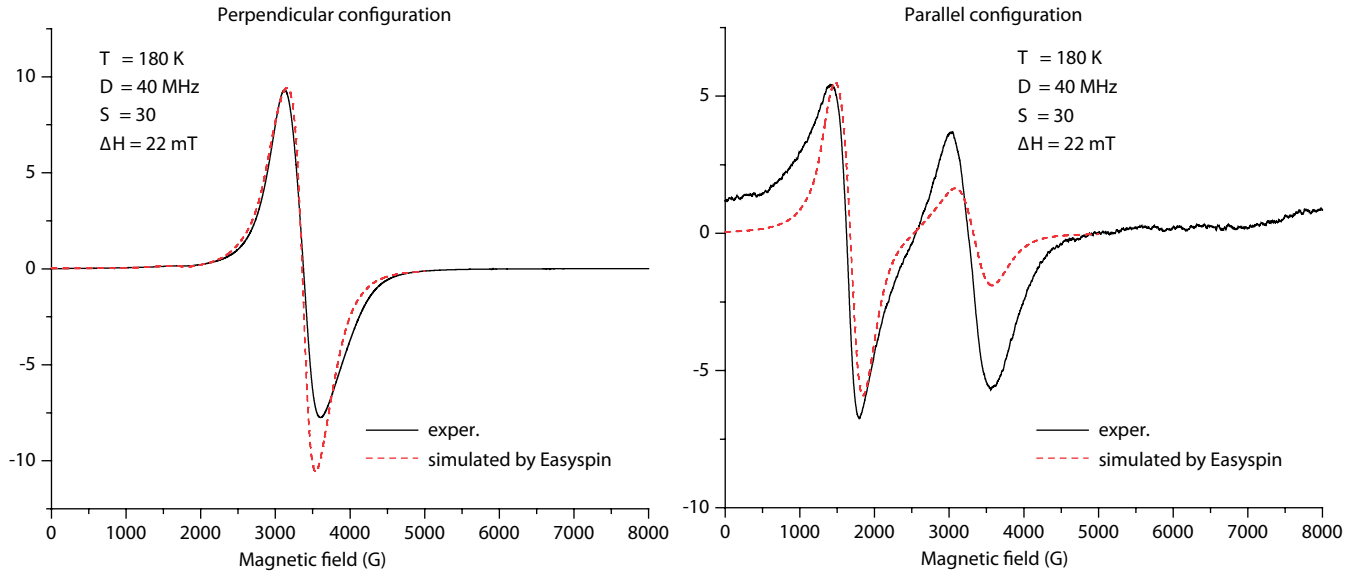


Рис. 7. Экспериментальные (сплошные линии) и теоретические (пунктирные линии) спектры ЭМР НЧ в дендримере при 180 К для перпендикулярной и параллельной конфигураций.

тонкой структуры, то есть, НЧ можно рассматривать как квантовые объекты.

Работа выполнена совместно с соавторами: М. С. Груздевым (ИХР РАН, синтез и характеристика дендримерного нанокомпозита), Ю. Н. Швачко (ИФМ УрО РАН), Д. В. Стариченко (ИФМ УрО РАН) (проведение измерений магнитной восприимчивости).

Литература

1. Lu A.H., Schmidt W., Matoussevitch N., Bonnemann H., Spliethoff B., Tesche B., Bill E., Kiefer W., Schuth F.: Angew. Chem., Int. Ed. **43**, 4303–4306 (2004)
2. Hyeon T.: Chem. Commun. **2003**, 927–934 (2003)
3. Shinjo T.: Nanomagnetism and Spintronics. Amsterdam: Elsevier 2009.
4. Laurent S., Forge D., Port M., Roch A., Robic C., Elst L., Muller R.: Chem. Rev. **108**, 2064–2110 (2008)
5. Chikazumi S., Taketomi S., Ukita M., Mizukami M., Miyajima H., Setogawa M., Kurihara Y.: J. Magn. Magn. Mater. **65**, 245–251 (1987)
6. Gupta A.K., Gupta M.: Biomaterials **26**, 3995–4021 (2005)
7. Andra W., Nowak H.: Magnetism in Medicine. Weinheim: Wiley-VCH 2007.
8. Fittipaldi M., Sorace L., Barra A.L., Sangregorio C., Sessoli R., Gatteschi D.: PhysChemChemPhys. **11**, 6555–6568 (2009)
9. Wernsdorfer W.: Adv. Chem. Phys. **118**, 99–190 (2001)
10. Noginova N., Weaver T., Giannelis E.P., Bourlinos A.B., Atsarkin V.A., Demidov V.V.: Phys. Rev. B: Condens. Matter Mater. Phys. **77**, 014403 (2008)
11. Fittipaldi M., Mercatelli R., Sottini S., Ceci P., Falvo E., Gatteschi D.: PhysChemChemPhys. **18**, 3591–3597 (2016)
12. Domracheva N., Pyataev A., Manapov R., Gruzdev M.: ChemPhysChem. **12**, 3009–3019 (2011)
13. Raikher Yu.L., Stepanov V.I.: J. Magn. Magn. Mater. **316**, 417–421 (2007)
14. Domracheva N., Vorobeva V., Gruzdev M., Pyataev A.: J. Nanopart. Res. **17**, 83 (2015)
15. Stefan Stoll, http://easyspin.org/easyspin/documentation/references.html (accessed 17.05.17)

Магнитные взаимодействия в структуре $[Fe(salen)(2\text{-}Me\text{-}Him)]_n$

Т. А. Иванова, О. А. Туранова, Л. В. Мингалиева, И. В. Овчинников

Лаборатория молекулярной радиоспектроскопии, лаборатория спиновой физики и спиновой химии

Синтезировано новое соединение на базе сален-содержащего четырёхдентатного комплекса с замещённым имидазолом в качестве мостикового лиганда. На основании данных магнитного резонанса и измерений магнитной восприимчивости показана возможность образования в соединении антиферромагнитных цепочек со структурой скошенных магнитных моментов, где за счёт обменных антисимметричных взаимодействий возникает спонтанная ферромагнитная намагниченность. Особенности температурной зависимости намагниченности свидетельствуют о переходе магнитной системы в состояние спинового стекла при температурах <30 К. Предложена модель, предполагающая образование комплексами [Fe(salen)(2-Me-Him)] линейных и зигзагообразных антиферромагнитных цепочек конечной длины (олигомеров).

Координационные соединения Fe(III), содержащие тетрадентатный лиганд salen, активно изучаются из-за их специфических физических и биологических свойств [1–3]. Большой интерес вызывают полиядерные структуры на их основе, проявляющие широкий спектр магнитных свойств в различных температурных диапазонах [4, 5]. Тетрадентатные лиганды salen имеют чёткую тенденцию к формированию линейных или зизагообразных цепей, так как обычно образуют плоскую конфигурацию в октаэдрической координационной геометрии комплексов Fe(III), оставляя аксиальные положения свободными для связи бидентатными мостиковыми лигандами. Эта тенденция была реализована в работах [6–8], где в качестве мостиковых лигандов использованы простые анионы, такие как ацетат (ac) и дицианамид (dca) и образование одномерных цепочек подтверждено рентгеноструктурным анализом. В работе [8] впервые использована методика синтеза новой серии полимерных комплексов $[Fe(salen)(HL)]_n$ из μ-оксокомплекса $[\{Fe(salen)\}_2O]$ и N-донорных анионных гетероциклических мостиковых лигандов Himz, Hatz, Hmtz, Hbimz, Htriz, Hbtriz. Магнитные свойства полученных соединений были охарактеризованы методами магнитной восприимчивости и мессбауэровской спектроскопии. В ряду исследованных соединений в случае HL = Hatz было обнаружено магнитное упорядочение при температуре 3.3 К, что, по мнению авторов, связано с наличием аминогруппы в мостиковом лиганде Hatz (анион 5-амино-тетразолид), ответственной за водородные связи между цепочками. Это обстоятельство указывает на возможность влияния на магнитные свойства (salen)-содержащих цепочек путём введения в мостиковый лиганд HL заместителей, способных участвовать в образовании межмолекулярных связей. С этой целью в данной работе впервые получен и исследован полиядерный координационный полимер Fe(III) на основе лиганда salen и мостикового 2-метилзамещённого имидазольного лиганда.

Экспериментальная часть

Было синтезировано новое соединение $[Fe(salen)(2\text{-}Me\text{-}Him)]_n$ и исследовано методами МР-спектроскопии и магнитной восприимчивости в диапазоне температур 5–300 К.

Методика синтеза в основном аналогична описанной в [8]. В составе молекулы имидазола имеются атомы азота пиридинового и пиррольного типов: в зависимости от условий могут проявляться как основные, так и кислотные свойства. Для получения полимерной цепочки в ходе данной реакции были задействованы оба центра (рис. 1). Так как для отщепления кислотного пиррольного протона необходимы жесткие условия, то реакцию проводили кипячением при температуре выше 115 °С. μ-оксокомплекс $[\{Fe(Salen)\}_2O]$ смешивали с большим избытком 2-метилимидазола в н-бутаноле и кипятили 2 часа. Осадок светло-коричневого цвета, выпавший после вакуумирования 1/3 объёма растворителя и охлаждения остатка, отфильтровали, промыли диэтиловым эфиром и сушили на воздухе. Выход 38%.

Измерения МР выполненены на ЭПР спектрометре EMX plus с температурной приставкой ER4131VT.

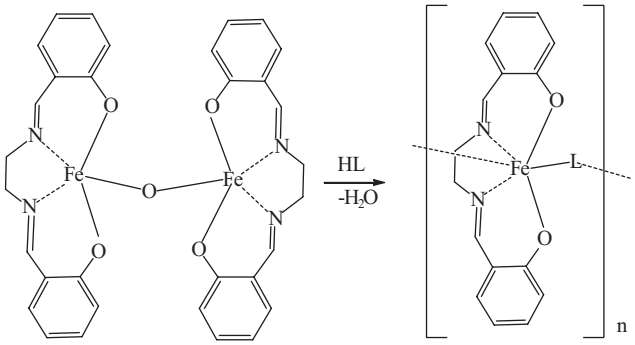


Рис. 1. Реакция синтеза соединения $[Fe(salen)(2\text{-}Me\text{-}Him)]_n$.

Температурная и полевая зависимости намагниченности образов измерялись на оборудовании Федерального центра коллективного пользования КФУ – магнетометре системы PPMS-9.

Результаты измерений

Спектры магнитного резонансного поглощения, записанные в форме первой производной по полю, представляют собой сложную линию, которую можно представить как сумму двух перекрывающихся спектров **1** и **2** (рис. 2). Спектр **1** имеет стандартную форму первой производной с эффективными параметрами $g_{\text{eff}} \sim 2.0$ и $\Delta H_{\text{eff}} \sim 1100$ Э (ширина от пика до пика). Для спектра **2** характерны ненулевое значение поглощения в нулевом магнитном поле, отрицательное поглощение во всём диапазоне изменения магнитного поля (вплоть до 10000 Э) с минимумом при ~1400 Э. Он может быть представлен как линия поглощения в виде первой производной, сдвинутая в сторону слабых полей на величину порядка 3000 Э относительно сигнала **1**, так что положительный пик производной не регистрируется. Такая интерпретация была подтверждена измерениями спектра в Q-диапазоне, где смещение спектра **2** составляет ~5000 Э относительно сигнала **1** (~12200 Э) и наблюдается обычная по форме первая производная линии поглощения **2** (рис. 3). В замороженном растворе комплексов $[\text{Fe(salen)(2-Me-Him)}]_n$ в хлороформе сигнал **2** отсутствовал.

Как видно из рис. 2, при изменении температуры наблюдается различное соотношение интенсивностей сигналов **1** и **2**. В интервале 5–30 К в спектре присутствует только сигнал **2**, причём его интенсивность практически не зависит от температуры (в пределах ошибок эксперимента). В интервале 30–300 К, где оба сигнала перекрываются, постоянство интенсивности сигнала **2** не столь очевидно. Однако спектры Q-диапазона дают доказательство постоянной интенсивности сигнала **2** также для диапазона температур 100–300 К (рис. 3). Поэтому с большой степенью вероятности можно утверждать, что интенсивность сигнала **2** не меняется во всём интервале температур 5–300 К. С повышением температуры в спектре возникает и усиливается сигнал **1**. Чтобы корректно описать температурную зависимость его интегральной интенсивности, мы провели разложение спектров на две составляющие в предположении постоянной интенсивности сигнала **2** и оценивали интегральную интенсивность сигнала **1**, выделенного из суммарной кривой. Приведённая на рис. 4 температурная зависимость интегральной интенсивности имеет широкий максимум при температуре $T_{\max} = 100$ К, что в сочетании со спектроскопическими параметрами сигнала **1** позволяет интерпретировать его как обменную линию от антиферромагнитно связанных центров. Положение максимума температурной зависимо-

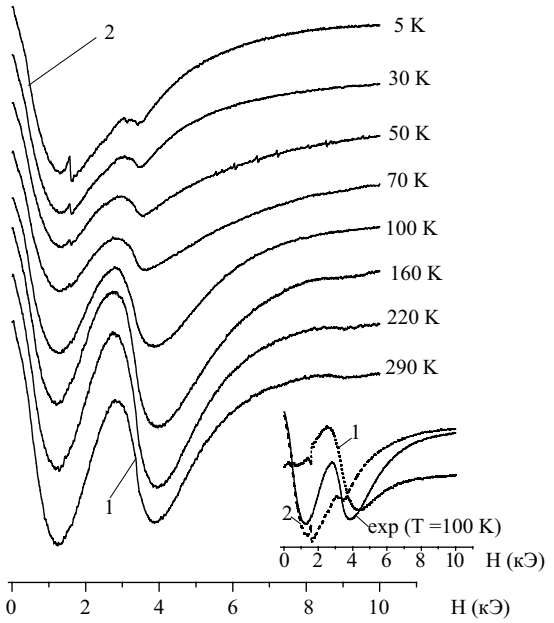


Рис. 2. Температурная зависимость спектров магнитного резонанса $[\text{Fe(salen)(2-Me-Him)}]_n$; ν = 9.47 ГГц. На вставке – разложение спектра T = 100 К на две компоненты.

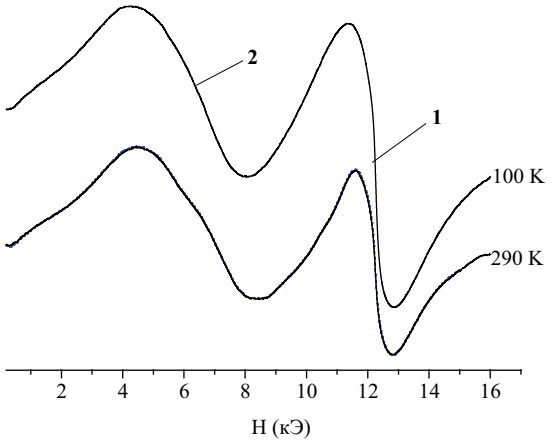


Рис. 3. Спектры магнитного резонанса $[\text{Fe(salen)(2-Me-Him)}]_n$; ν = 34.22 ГГц.

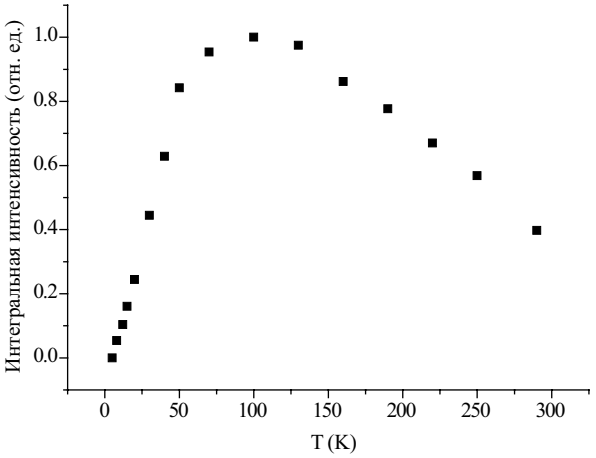


Рис. 4. Температурная зависимость интегральной интенсивности сигнала **1** $[\text{Fe(salen)(2-Me-Him)}]_n$.

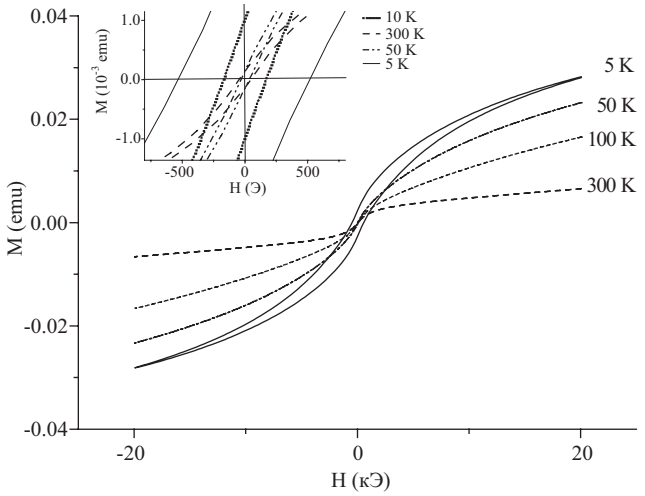


Рис. 5. Зависимость намагниченности от внешнего магнитного поля. На вставке – полевая зависимость намагниченности в области слабых полей.

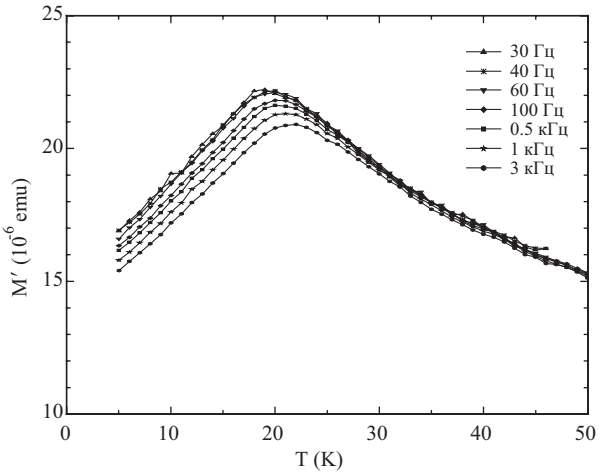


Рис. 7. Температурная зависимость реальной части намагниченности на разных частотах в режиме ac-измерений.

сти интегральной интенсивности соответствует величине обменного взаимодействия J = 17 см$^{-1}$ в упрощенной модели Фишера, описывающей магнитную восприимчивость бесконечной спиновой цепочки с учётом реального спина 5/2 [9].

При измерениях полевой зависимости намагниченности обнаружен гистерезис магнитных свойств. В интервале температур 30–300 К петля гистерезиса наблюдается при малых значениях магнитного поля на фоне общего увеличения намагниченности с увеличением магнитного поля. Её параметры (остаточная намагниченность ~$1.5 \cdot 10^{-4}$ emu, коэрцитивная сила ~40 Э) практически не зависят от температуры (рис. 5). Это указывает на наличие спонтанной ферромагнитной намагниченности наряду с доминирующими антиферромагнитными свойствами. С понижением температуры остаточная намагниченность и коэрцитивная сила петли гистерезиса резко увеличиваются и достигают при 5 К ~0.0023 emu и ~540 Э соответственно, что связано, видимо, с проявлением при низких температурах дополнительных ферромагнитных взаимодействий.

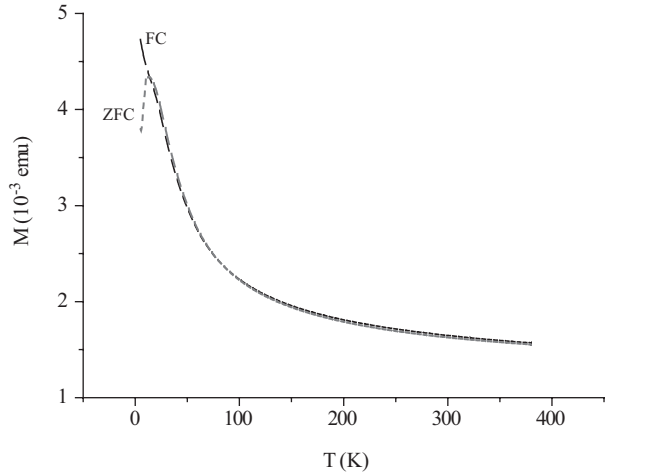


Рис. 6. Температурная зависимость намагниченности при охлаждении в нулевом магнитном поле (ZFC) и в поле 1000 Э (FC) в режиме dc-измерений.

О возникновении дополнительных ферромагнитных взаимодействий при низких температурах свидетельствует также различный ход температурной зависимости статической намагниченности $M_{dc}(T)$, наблюдаемый в образце при его охлаждении в магнитном поле 1000 Э (FC) и в нулевом магнитном поле (ZFC): намагниченность в режиме FC монотонно увеличивается с понижением температуры, тогда как намагниченность в режиме ZFC имеет максимум при температуре 13.5 К (рис. 6). Измерения динамической намагниченности показали, что максимум температурной зависимости действительной части намагниченности $M_{ac}(T)$ сдвигается в сторону более высоких температур при повышении частоты (рис. 7).

Обсуждение результатов

Нестандартная форма спектра МР, аналогичная сигналу **2** на рис. 2 (X-диапазон), наблюдалась ранее в работах [10, 11]. Интенсивное резонансное поглощение с большой шириной линии, сдвинутое в сторону слабых магнитных полей, интерпретировалось в [10] как результат совместного воздействия внешнего H_0 и внутреннего H_{int} магнитного поля. Условие резонанса для магнитных частиц записывалось как $h\nu = g\mu_B(H_0 - H_{int})$. Поскольку объектами исследования были суперпарамагнитные частицы, обладающие большой величиной магнитного момента, авторы считали, что внутренне магнитное поле создаётся в основном за счёт диполь-дипольных взаимодействий соседних наночастиц и агрегатов, а также размагничивающим полем наночастиц. Проведённые в [12] оценки сдвига линии МР взаимодействующих магнитных центров показали, что только диполь-дипольные взаимодействия слабо влияют на положение линии в магнитном поле, в то время как обменные связи оказывают существенно бóльшее влияние на резонансное поле, уменьшая его. В

[11] объектами исследования были поликристаллические соединения $(La_{1-x}Sr_x)_2ZnIrO_6$. Линия, аналогичная по форме наблюдаемому нами сигналу **2**, детектируется в довольно узком температурном диапазоне 10–20 К и называется авторами “резонансом в нулевом поле”. Её происхождение, особенности формы и температурной зависимости не обсуждаются. В нашем случае наблюдаемый в спектрах МР сдвиг сигнала **2** в сторону слабых магнитных полей связан, по-видимому, с обменными взаимодействиями в образце, не достаточными по величине для упорядочения магнитных моментов, но создающими внутреннее магнитное поле H_{int}. При измерениях в более высокочастотном диапазоне (рис. 3) сигнал **2** имел стандартную форму первой производной. Его смещение относительно сигнала **1** составляло порядка 5000 Э (оценивалось как разность величин магнитного поля, соответствующих g_{eff}-фактору сигналов **1** и **2**) при эффективой ширине сигнала ~7000 Э. что позволило детектировать линию поглощения полностью.

Исходя из особенностей строения мостикового лиганда (2-Me-Him) (молекула несимметрична относительно направления связи между двумя атомами азота, напрямую связанными с Fe(III) и участвующими в построении цепочки), можно ожидать зигзагообразную конфигурацию цепочки и отсутствие центра инверсии в образующих её парамагнитных центрах. В этом случае может возникать антисимметричное обменное взаимодействие Дзялошинского-Мории, которое приводит к нестрогой антипараллельности векторов намагниченности магнитных подрешёток антиферромагнетика и проявлению ферромагнетизма в перпендикулярном направлении (поперечный слабый ферромагнетизм) [11, 13]. По-видимому сдвиг сигнала **2** в сторону слабых магнитных полей обусловлен именно этим спонтанным ферромагнетизмом. Вместе с тем, нельзя исключить существование в образце линейных цепочек, в которых взаимодействие Дзялошинского-Мории отсутствует и наблюдается сигнал **1**, обусловленный антиферромагнитными взаимодействиями по оси цепочки. Отсутствие сигнала **2** в замороженном растворе комплексов $[Fe(salen)(2\text{-}Me\text{-}Him)]_n$ в хлороформе, может быть связано с изменением конфигурации зигзагообразной цепочки при вхождении в комплекс молекулы растворителя.

На существование в образце спонтанной ферромагнитной намагниченности указывает гистерезис магнитных свойств, обнаруженный при измерениях полевой зависимости намагниченности $M(H)$. В диапазоне температур 30–100 К наблюдение магнитной петли гистерезиса в малых полях сочеталось с линейно-подобным увеличением намагниченности в высоких полях. Как отмечалось в [11, 13], эта особенность характерна для для антиферромагнитных цепочек со скошенными магнитными моментами. Постоянство параметров петли гистерезиса в этом интервале температур коррелирует с отмеченным ранее свойством сигнала **2** в спектре МР сохранять свою форму и интенсивность при изменении температуры. По-видимому за формирование сигнала **2** и гистерезиса намагниченности ответственен один и тот же механизм, а именно, спонтанная ферромагнитная намагниченность, возникающая за счёт взаимодействия Дзялошинского-Мории в антиферромагнитных цепочках со скошенными магнитными моментами.

В диапазоне более низких температур (<30 К) изменяются параметры петли гистерезиса намагниченности: увеличиваются её коэрцитивная сила и остаточная намагниченность. Кроме того, в этом температурном диапазоне имеет место зависимость температурной зависимости намагниченности от условий размагничивания образца (см. рис. 6): при охлаждении образца в отсутствие магнитного поля температурная зависимость намагниченности (ZFC) имеет излом при температуре T = 13.5 К; при охлаждении образца от температуры T = 300 К в поле H = 1000 Э (верхняя кривая) (FC) излом отсутствует. Такое поведение намагниченности наблюдается как в образцах, состоящих из суперпарамагнитных частиц [14], так и в спиновых стёклах [15]. В обоих случаях точку перегиба определяют как температуру блокировки, ниже которой тепловые колебания магнитных частиц заморожены и проявляется гистерезис магнитных свойств. Вероятно, отмеченное выше изменение параметров петли гистерезиса при низких температурах объясняется наложением дополнительной петли гистерезиса, возникшей вследствие блокировки магнитных моментов. Отличительной чертой системы магнитных частиц в состоянии спинового стекла является сдвиг максимума температурной зависимости реальной части магнитной восприимчивости при изменении частоты в режиме измерения динамической восприимчивости [16]. Поскольку положение максимума зависимости $M_{ac}(T)$ зависит от частоты (см. рис. 7), можно заключить, что исследуемый образец при низких температурах переходит в состояние спинового стекла. Возможная модель, в рамках которой удаётся объяснить совокупность полученных экспериментальных результатов, состоит в следующем. Комплексы [Fe(salen)(2-Me-Him)] образуют линейные и зигзагообразные антиферромагнитные цепочки конечной длины (олигомеры). При охлаждении ниже температуры блокировки тепловые колебания олигомеров затормаживаются и система переходит в состояние спинового стекла. Реализации спин-стекольного состояния способствуют беспорядочное распределение олигомеров разной длины в объёме образца.

Авторы выражают благодарность сотруднику Института физики Казанского федерального университета И. Ф. Гильмутдинову за проведение измерений температурных и полевых зависимостей намагниченности.

Литература

1. Левин О.В.: Вестник технологического университета **19**, вып. 22, 5–14 (2016)
2. Kavitha P., Karuppasamy P.: JACS **2** (2), 255–258 (2016)
3. Hilt G., Walter C., Bolze P.: Adv. Synth. Catal. **348**, 1241–1247 (2006)

4. Ross T.M., Neville S.M., Innes D.S., Turner D.R., Moubaraki B., Murray K.S.: Dalton Trans. **39**, 149–159 (2010)
5. Liu P.P., Wang C.Y., Zhang M., Song X.Q.: Polyhedron **129**, 133–140 (2017)
6. Liu G., Arif A.M., Bruenger F.W., Miller S.C.: Inorg. Chim. Acta **287**, 109–112 (1999)
7. Shi Q., Cao R., Li X., Luo J. H., Hong M.C., Chen Z.N.: New J. Chem. **26**, 1397–401 (2002)
8. Herchel R., Sindelar Z., Travnıcek Z., Zboril R., Vanco J.: Dalton Trans. **44**, 9870–9880 (2009)
9. Fisher M.: Am. J. Phys. **32**, 343–346 (1964)
10. Guskos N., Anagnostakis E.A., Guskos A.: J. of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering (JAMME) **24**, 26–34 (2007)
11. Zhu W.K., Lu C.K., Tong W., Wang J.M., Zhou H.D., Zhang S.X.: Phys. Rev. B **91**, 144408 (2015)
12. Verdes C.G., Ruiz-Diaz B., Thompson S.M., Chantrell R.W., Stancu Al.: J. Appl. Phys. **89**, 7475–7477 (2001)
13. Manna K., Sarkar R., Fuchs S., Onykiienko Y.A., Bera A.K., Cansever G.A., Kamusella S., Maljuk A., Blum C.G.F., Corredor L.T., Wolter A.U.B., Yusuf S.M., Frontzek M., Keller L., Iakovleva M., Vavilova E., Grafe H.-J., Kataev V., Klauss H.-H., Inosov D.S., Wurmehl S., Büchner B.: Phys. Rev. B **94**, 144437 (2016)
14. Губин С.П., Кокшаров Ю.А., Хомутов Г.Б., Юрков Г.Ю.: Успехи химии **74**, 539–574 (2005)
15. Petrakovskii G.A., Aleksandrov K.S., Bezmaternikh L.N., Aplesnin S.S., Roessli B., Semadeni F., Amato A., Baines C., Bartolome J., Evangelisti M.: Phys. Rev. B **63**, 184425 (2001)
16. Manna K., Samal D., Elizabeth S., Bhat H.L., Kumar P.S.A.: J. Phys. Chem. C **115**, 13985–13990 (2011)

^{31}P ЯМР спектроскопия крови крыс при травме спинного мозга

С. В. Юртаева, М. Ю. Волков, Г. Г. Яфарова

Отдел химической физики, лаборатория молекулярной радиоспектроскопии, лаборатория спиновой физики и спиновой химии

Методом ^{31}P ЯМР спектроскопии изучена кровь контрольных крыс и крыс с 3-х суточной травмой спинного мозга (ТСМ). Обнаружены фосфорсодержащие соединения крови: 2,3-дифосфоглицераты, неорганические фосфаты, фосфолипиды, аденозинтрифосфаты и монофосфаты. Установлено, что при ТСМ наблюдается увеличение количества 2,3-дифосфоглицератов, неорганических фосфатов, фосфолипидов.

Введение

Травматическое повреждение спинного мозга (ТСМ) – одна из острых проблем нейробиологии и медицины. На сегодняшний день не существует эффективных методов лечения повреждения спинного мозга. Одной из причин сложившейся ситуации является многофакторный характер молекулярных процессов при ТСМ. Морфологическое изучение травмированного спинного мозга указывает на то, что разрушение ткани не ограничивается областью воздействия в момент травмы, а продолжается во времени, захватывая первично интактные участки мозга, и приводя к образованию большего очага повреждения, чем начальная травма. Поиск новых подходов к лечению ТСМ побуждает исследователей к более глубокому и детальному изучению механизмов патогенеза травматической болезни спинного мозга. Вследствие этого становится актуальным применение новых методов получения молекулярной информации, недоступной при применении традиционных биохимических и клинических методов исследования.

Одним из источников новых данных о ТСМ может стать ^{31}P ядерная магнитно-резонансная (ЯМР) спектроскопия крови, поскольку она даёт возможность неинвазивным методом получить важную информацию о метаболизме при развитии патологических состояний. Фосфорные соединения участвуют в регуляции кислотно-основного состояния, в процессах обмена веществ, являются важнейшими аккумуляторами и переносчиками энергии. По их количеству можно судить об общем состоянии организма. ^{31}P ЯМР спектроскопия позволяет охарактеризовать органические и неорганические соединения фосфора в крови, такие как: 2,3-дифосфоглицераты, неорганические фосфаты, фосфолипиды, аденозинтрифосфаты (АТФ) и некоторые другие. Метод ^{31}P ЯМР спектроскопии позволяет изучать проблемы, связанные с изменением энергетического обмена, гипоксией, а также оценивать уровень pH в клетках.

Значительная часть фосфорных соединений находится в эритроцитах. Поскольку эритроцит, в частности его мембрана, является своеобразным “зеркалом”, отражающим состояние клеток других тканей и систем организма, то изучение соединений фосфора в крови методом ЯМР представляет интерес для оценки состояния организма при ТСМ в целом. В частности количественная оценка 2,3-дифосфогицератов в эритроцитах при ТСМ может дать ценную информацию о гипоксии, что важно для понимания патофизиологии травмы спинного мозга.

^{31}P ЯМР спектроскопия ранее уже использовалась при изучении эритроцитов, плазмы крови и цельной крови [1–7]. Проводились исследования крови пациентов с различными патологиями [3, 5, 8, 9, 10] и крови лабораторных животных [4]. Было показано, что ^{31}P ЯМР спектроскопия позволяет произвести количественную оценку изменения фосфорсодержащих соединений в крови и, следовательно, может обладать прогностическим потенциалом при различных заболеваниях.

^{31}P ЯМР спектроскопия также использовалась in vivo при изучении изменений фосфорного метаболизма непосредственно в спинном мозге после экспериментальной ТСМ у животных [11–13]. Было обнаружено уменьшение внутриклеточного pH, потеря высокоэнергетических фосфатов, а также значительное уменьшение (в первые часы после травмы) сигнала, соответствующего миелиновым фосфолипидам. Было показано, что на основе ранних изменений в метаболизме, выявленных с помощью ЯМР спектроскопии, можно предвидеть необратимые изменения в тканях.

Целью данной работы было методом ^{31}P ЯМР спектроскопии идентифицировать фосфорные метаболиты в крови, оценить изменение их количества при ТСМ, оценить внутриклеточное pH.

Полученная информация впоследствии могла бы быть применена для мониторинга общего состояния организма при ТСМ. Использование метода ЯМР для изучения состава крови при ТСМ в перспективе даёт возможность наблюдать за процессом в динамике и оперативно корректировать тактику лечения.

Образцы

Использовались образцы крови крыс двух групп – контрольных крыс (n = 7) и крыс с экспериментальной моделью ТСМ (n = 7). Моделирование ТСМ осуществлялось по

методике Аллен [14], забор венозной крови осуществлялся из правого желудочка сердца на 3-и сутки после повреждения. Период 3-е суток после травмы соответствует окончанию острой фазы развития травматического процесса. Кровь забирали в шприцы, промытые 5% раствором цитрата натрия для предотвращения свертывания. Крысам был введён комбинированный внутримышечный наркоз (Zoletil 50 1 мг/кг и “Ксилавет” 0.1 мл/кг) и все манипуляции с ними проводились с соблюдением биоэтических норм. Кровь объёмом 0.7–0.8 мл помещали в стандартные вакуумные ампулы, обработанные антикоагулянтом – этилендиаминтетрауксусной кислотой (ЭДТУ), и затем доставляли в ЯМР лабораторию. ЯМР измерения проводились через 1 час после забора крови.

ЯМР измерения

Все ЯМР эксперименты были выполнены на ЯМР спектрометре Avance 400 производства фирмы Bruker. Измерения спектров проводились при температуре 20 °C в стандартных 5-мм ампулах для ЯМР измерений. Несущая частота для ядер ^{31}P составляла 162 МГц. Длительность 90° импульсов равнялась 14 мкс. Ширина ^{31}P спектров составляла 15 кГц. Число точек, используемых при регистрации ССИ, равнялось 8192. Количество накоплений составляло 1024. Задержка между циклами составляла 3 сек. ^{31}P спектры калибровались по 85% водному раствору H_3PO_4. Накопление и обработка спектров производились программой XWIN-NMR 3.5.

Экспериментальные результаты и обсуждение

Методом ЯМР спектроскопии были изучены 14 образцов цельной крови: крыс контрольной группы (n = 7) и крыс на 3-и сутки после ТСМ (n = 7). Известно, что основными сигналами в ^{31}P ЯМР спектре цельной крови являются сигналы от 2,3-дифосфоглицератов, неорганических фосфатов и молекул АТФ. В данном исследовании в ^{31}P ЯМР спектрах крови наблюдалось от 4-х до 6-ти линий.

В области положительных химических сдвигов в типичных ЯМР спектрах крови регистрировались четыре основные интенсивные линии (1, 2, 3 и 4) (рис. 1). В некоторых случаях (преимущественно у крыс с ТСМ) дополнительно появлялись одна или две слабые линии (5, 6) (рис. 1).

Интенсивные сигналы 1 и 2 традиционно относят к 2,3-дифосфоглицератам (2,3-ДФГ) [1–7]. 2,3-ДФГ – это молекулы, образующиеся при недостатке кислорода как промежуточный продукт гликолиза. 2,3-ДФГ способны связываться с дезоксигемоглобином, уменьшая сродство гемоглобина к кислороду и облегчая переход кислорода в клетки тканей. Поэтому интенсивность соответствующих им линий отражает количество деоксигемоглобина в крови и является показателем гипоксии. При нарастании гипоксии в организме интенсивность этих сигналов увеличивается. Поскольку 2,3-ДФГ находятся в эритроцитах,

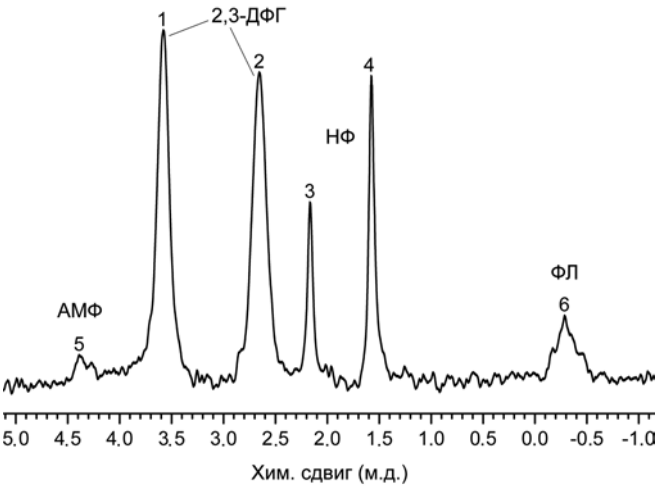


Рис. 1. Типичный ^{31}P ЯМР спектр крови травмированной крысы.

то линии 2,3-ДФГ (линии 1 и 2) регистрируются только в эритроцитах и цельной крови [1–7], в плазме они не обнаружены [2, 3].

Сигналы 3 и 4 соответствовали неорганическим фосфатам (НФ).

В процессе хранения образцов интенсивность линий может изменяться, поскольку некоторые биохимические процессы в образцах продолжаются, но с меньшей скоростью. Поэтому для подбора корректного режима измерений была проанализирована динамика изменения линий ЯМР спектров через 1, 2, 3 и 4 часа после забора крови и через сутки (рис. 2). Было установлено, что с течением времени интенсивность линий 1 и 2 несколько уменьшается. Уменьшение интенсивности сигнала в течение первого часа не превышало 10%. Поэтому все измерения проводились в одинаковых условиях через 1 час после забора крови.

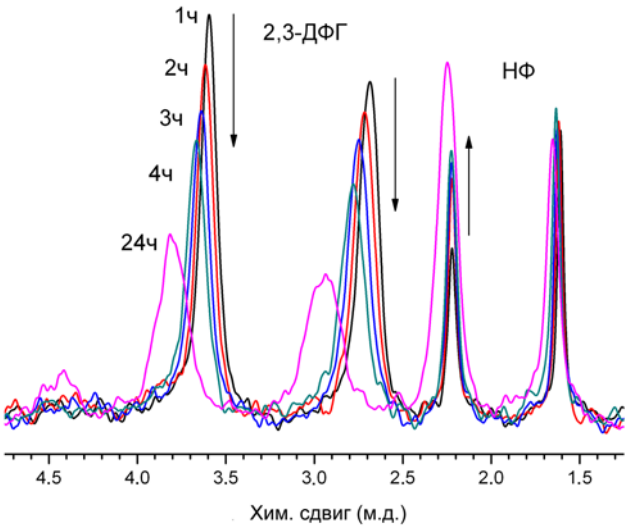


Рис. 2. Динамика изменения основных ^{31}P ЯМР сигналов в крови контрольной крысы.

Сигнал 3 с течением времени увеличивался, а сигнал 4 был наиболее стабильным, он не изменялся по интенсивности в течение 4-х часов. Исходя из этого, было установлено, что более стабильный сигнал 4 соответствовал более устойчивой химической среде внутри клеток, а сигнал 3 – внеклеточной среде (плазме крови), и его усиление соответствовало выделению неорганической фосфатной части молекул из органических фосфатов in vitro.

При интерпретации линий 3 и 4 также учитывалось, что положение линий НФ зависит от pH среды [1], причём с увеличением pH частота резонансной линии должна возрастать. Поскольку известно, что среднее значение pH крови составляет ~7.4, а pH внутри клеток организма, включая эритроциты, ниже, и колеблется в пределах 7.0–7.2, то, в соответствии с закономерностью, установленной в [1], химический сдвиг НФ в эритроците должен быть меньше, чем у фосфата, находящегося вне клетки (в плазме крови). Следовательно, линия 3 соответствует НФ в плазме, а линия 4 – НФ в эритроцитах.

Следует отметить, что в фосфорных ЯМР спектрах образцов эритроцитарной массы [1, 2, 6–9, 15] и плазмы крови [2, 3] регистрировалась только одна линия НФ, а в работах по изучению цельной крови [1, 5], тканей сердца и крови in vivo [16], как и в нашем случае, наблюдались две линии НФ, характеризующие неорганические фосфаты вне и внутри клеток по-отдельности.

Линия 5 (рис. 1) в соответствии с данными [7, 8, 17] соответствовала аденозинмонофосфату (АМФ), продукту дефосфориллирования АТФ. Эта линия наблюдалась в области ~4.4 м.д., имела слабую интенсивность и была более заметной в крови крыс с ТСМ, однако оценить её количественно не удалось из-за большого уровня шумов.

Ещё одна слабая линия, обозначенная как линия 6 (рис. 1), регистрировалась в области отрицательных хим. сдвигов: –0.3 ÷ –0.4 м.д. Линия 6 соответствовала фосфолипидам [1, 2, 5, 15]. Данная линия наблюдалась в ЯМР спектрах преимущественно при ТСМ, у контрольной группы она практически не регистрировалась (была зарегистрирована только у одной крысы).

Кроме рассмотренных выше линий 1–6 в области отрицательных хим. сдвигов в спектрах ЯМР регистрировались также слабые сигналы в области –5 м.д., –10 м.д. и –19 м.д., которые соответствовали γ-, α- и β-АТФ [2–5, 7–9]. Однако они имели слабую интенсивность, что не позволило выявить какое-либо заметное количественное изменение АТФ в крови травмированных крыс.

После травмирования крыс в ^{31}P ЯМР спектрах крови были обнаружены изменения, которые приведены на рис. 3. В условиях ТСМ линии 1–4 смещались относительно их положения в контрольных спектрах. На основе ЯМР спектров были оценены значения химических сдвигов и интегральных интенсивностей для всех типов линий, где это было возможно, и вычислены их средние значения. Средние значения параметров приведены в таблице 1, интегральные интенсивности – на рис. 4.

Наиболее заметными эффектами можно считать увеличение интенсивности линий и уменьшение значений химических сдвигов в ^{31}P ЯМР спектрах при ТСМ. Детально обнаруженные различия характеризуются следующим образом:

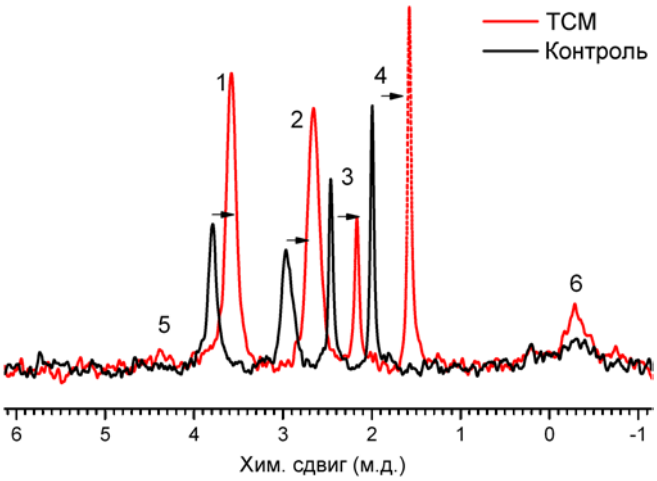


Рис. 3. Пример изменения ^{31}P ЯМР спектров крови крыс после ТСМ.

1. В ^{31}P ЯМР спектрах крови травмированных крыс было обнаружено заметное увеличение интегральной интенсивности сигналов 1 и 2 от ядер фосфора в составе 2,3-ДФГ (рис. 3 и рис. 4) в среднем на 40% по сравнению с контрольной группой.

Основная функция 2,3-ДФГ состоит в регуляции сродства гемоглобина к кислороду: молекула 2,3-ДФГ связывается с молекулой дезоксигемоглобина и стабилизирует деоксигенированный гемоглобин в форме Т-конформера. Известно, что при недостатке кислорода в среде концентрация 2,3-ДФГ в эритроцитах возрастает, вследствие чего сродство гемоглобина к кислороду снижается, кривая диссоциации оксигемоглобина смещается вправо и происходит увеличение поступления кислорода к тканям. Регуляция синтеза 2,3-ДФГ в эритроцитах является одним из основных адаптационных механизмов для облегчения транспорта кислорода в условиях гипоксии [21]. Уровень сигналов от 2,3-ДФГ в ЯМР спектрах коррелирует с уровнем гипоксии в периферических тканях и наблюдаемое нами увеличение сигналов свидетельствует о нарастании гипоксии тканей после ТСМ.

Таблица 1. Характеристики обнаруженных ^{31}P ЯМР сигналов.

^{31}P ЯМР сигналы	Средние значения хим. сдвига (м.д.)		Средние значения интегральной интенсивности (отн. ед.)	
	Контроль	ТСМ	Контроль	ТСМ
1	3.72	3.60	4.997	7.182
2	2.85	2.71	4.984	6.985
3	2.33	2.22	1.828	1.984
4	1.73	1.62	2.472	2.643
5	—	4.39	—	—
6	0.28 (1 кр)	0.37	0.352	1.912

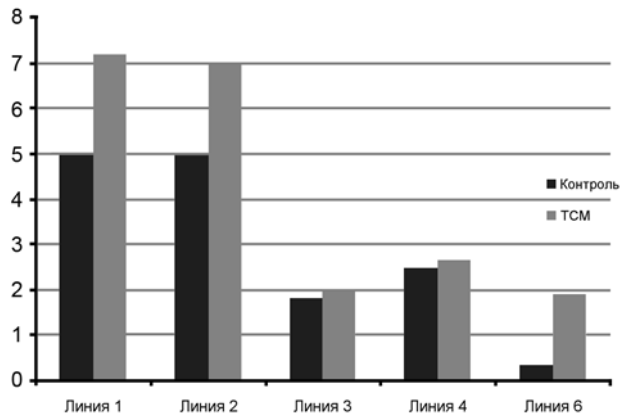


Рис. 4. Количественные изменения интегральных интенсивностей ^{31}P ЯМР линий в крови крыс при ТСМ.

2. Для всех интенсивных линий 1-4 при ТСМ было характерно уменьшение хим. сдвигов (рис. 3). Это означает, что при ТСМ уменьшается pH крови – возникает ацидоз. Уменьшение хим. сдвига линий 1–4 варьировалось от 0.1 до 0.4 м.д. Метод ЯМР позволяет детализировать изменение pH: так, смещение линий 1, 2 и 4 при травме свидетельствует о снижении pH внутри эритроцитов, а смещение линии 3 об уменьшении pH в плазме крови [1].

Как было показано в [1], положение линий 2,3-ДФГ зависит от pH. В данной работе смещение линий 1 и 2 при ТСМ, в среднем, составило соответственно 0.12 м.д. и 0.14 м.д. Авторы [1] изучили зависимость хим. сдвигов линий 2,3-ДФГ от pH и предложили методику оценки внутриклеточного pH в эритроците по величине хим. сдвига линий 1 и 2. Использование данной методики позволило нам оценить pH внутри клеток эритроцитов. Указанные выше изменения хим. сдвигов линий 1 и 2 соответствовали уменьшению pH на 0.1, внутри эритроцитов у контрольных крыс оно составляло ~ 7.2, а у крыс с ТСМ ~ 7.1.

3. Наряду с увеличением интенсивности сигналов 1 и 2, обнаружено увеличение интенсивности сигналов 3 и 4 от НФ, что может свидетельствовать об усилении процессов дефосфорилирования органических молекул в химической среде со сниженным pH. В крови травмированных крыс наблюдалось увеличение количества НФ на 8–9% (рис. 4). Это согласуется с результатами клинических исследований плазмы крови пациентов с ТСМ в течение 3-х месяцев после травмы [22], в которых было обнаружено увеличение количества фосфора.

4. Появление слабой линии АМФ (линия 5) при ТСМ может быть объяснено усилением процессов дефосфориллирования АТФ в условиях ацидоза, которые приводят к образованию аденозиндифосфатов (АДФ) и при последующем дефосфориллировании к образованию АМФ и НФ. Эти же процессы могут быть причиной усиления сигналов НФ.

5. В крови травмированных крыс также наблюдалось появление сигналов фосфолипидов (линия 6), которых практически не было в крови контрольных крыс. Усиление ^{31}P ЯМР сигнала фосфолипидов в крови травмированных крыс согласуется с результатами проведённых ранее ^{31}P ЯМР исследований спинного мозга in vivo у животных при травме и без неё. Авторы работы [12] с помощью ЯМР спектроскопии in vivo наблюдали в интактном спинном мозге широкий ^{31}P ЯМР сигнал, соответствующий миелиновым фосфолипидам. После ТСМ данный сигнал в спинном мозге значительно уменьшается [13], свидетельствуя о разрушении мембран нервных клеток. Кроме того, при ТСМ обнаружено уменьшение внутриклеточного pH [13].

Наблюдаемое закисление при патологии спинного мозга усиливает свободно-радикальные процессы и может вызывать гибель нейронов. Таким образом, появление сигнала фосфолипидов в нашем эксперименте в крови крыс после ТСМ может быть обусловлено выходом в кровь фосфолипидов мембран разрушенных клеточных структур спинного мозга. Однако нельзя исключить и процесс выхода фосфолипидов из мембран эритроцитов, разрушающихся в условиях гипоксии и ацидоза.

Результаты данной работы демонстрируют увеличение количества 2,3-ДФГ в крови крыс через 3 дня после травмы спинного мозга, что вероятно, является адаптивным ответом на нарастающую гипоксию тканей при данных условиях. Известно, что умеренная гипоксия является одним из факторов, которые приводят организм в состояние повышенной мобилизации. Различные исследования отмечают многочисленные изменения, которые можно было бы отнести к компенсаторно-приспособительным. В частности, известно, что гипоксия может влиять на продукцию оксида азота. Если сильная гипоксия приводит к подавлению продукции NO, то при умеренной гипоксии существует компенсаторный механизм, увеличивающий продукцию NO. Ранее, такие результаты были получены методом ЭПР спектроскопии в тканях крыс после ТСМ [23]. Они показали, что начиная с 3 суток, и далее, вплоть до 3-х месяцев после травмы, наблюдается увеличение продукции оксида азота. Точные механизмы компенсаторных перестроек в условиях гипоксии в настоящее время не полностью понятны. Авторы [24] отмечают, что ключевую роль в чувствительности к гипоксии играют эритроциты. Обнаруженное нами увеличение количества 2,3-ДФГ в крови после ТСМ является одним из путей увеличения поступления кислорода к тканям в условиях гипоксии посредством изменения сродства гемоглобина к кислороду. Путём индукции синтеза вазоактивных метаболитов, таких как NO, также увеличивается поступление кислорода крови к тканям за счёт расширения сосудов. Эти пути, по-видимому, пересекаются и взаимодействуют друг с другом.

Таким образом, методом ЯМР спектроскопии были получены новые данные о метаболизме фосфорных соединений в условиях травмы спинного мозга. Активация системы продукции оксида азота и обнаруженное увеличение 2,3-ДФГ после травмы спинного мозга свидетельствуют о компенсаторно-приспособительных

изменениях в условиях гипоксии и ацидоза, а сигналы ^{31}P ЯМР фосфолипидов могут служить индикатором степени разрушения клеточных структур.

Авторы благодарны сотрудникам кафедры физиологии человека и животных ИФМиБ КФУ Д. И. Силантьевой и Э. И. Ямалитдиновой за выполнение моделирования ТСМ на крысах и забор образцов.

Работа выполнена при поддержке Программы Президиума РАН.

Литература

1. Moon R.B., Richards J.H.: J. Biol. Chem. **248**, 7276–7278 (1973)
2. Henderson T.O., Costello A.J.R., Omachi A.: Proc. Nat. Acad. Sci. USA **71**, 2487–2490 (1974)
3. Horn M., Neubauer S., Bomhard M., Kadgien M., Schnackerz K., Ertl G.: Magma **1**, 55–60 (1993)
4. Horn M., Kadgien M., Schnackerz K., Neubauer S.: J. Cardiovasc. Magn. Reson. **2**, 143–149 (2000)
5. Lam Y.F., Lin A.K., Ho C.: Blood **54**, 196–209 (1979)
6. Chinayon S., Jinsart W., Eiam-ong S., Suvanpha R., Pansin P.: Thai J. Hlth. Resch. **2**, 1–8 (1988)
7. Ambruso D.R., Hawkins B., Johnson D.L., Fritzberg A.R., Klingensmith W.C., 3rd, McCabe E.R.: Biochem. Med. Metab. Biol. **35**, 376–383 (1986)
8. Кручинина М.В., Курилович С.А., Паруликова М.В., Громов А.А., Шакиров М.М.: Бюллетень СО РАМН **122**, № 4, 108–115 (2006)
9. Коротаева Н.С., Горохова В.Г., Кузнецова Э.Э., Чашкова Е.Ю., Пак В.Е., Порядина О.В.: Сибирский медицинский журнал № 2, 13–16 (2008)
10. Schott S., Hahn J., Kurbacher C., Moka D.: Int. J. Biomed. Sci. **8**, 258–263 (2012)
11. Vink R., Noble L.J., Faden A.I.: Ann. Neurol. **25**, 26–31 (1989)
12. O'Donnell J.M., Akino M., Zhu H., Stokes B.T.: Invest. Radiol. **31**, 121–125 (1996)
13. Akino M., O'Donnell J.M., Robitaille P.M., Stokes B.T.: Invest. Radiol. **32**, 382–388 (1997)
14. Allen A.R.: JAMA **57**, 878–880 (1911)
15. Labotka R.J.: Biochemistry **23**, 5549–5555 (1984)
16. Schmidt O., Bunse M., Dietze G.J., Lutz O., Jung W.I.: J. Cardiovasc. Magn. Reson. **3**, 325–329 (2001)
17. Heerschap A., Houtman C., in't Zandt H.J.A., van den Bergh A.J., Wieringa B.: Proc. Nutr. Soc. **58**, 861–870 (1999)
18. Barton R.H., Waterman D., Bonner F.W., Holmes E., Clarke R., Nicholson J.K., Lindon J.C.: Mol. Biosyst. **6**, 215–224 (2010)
19. Tea I., Le Gall G., Kuster A., Guignard N., Alexandre-Gouabau M.C., Darmaun D., Robins R.J.: PLoS ONE **7**, e29947 (2012)
20. Gowda G.A.N., Raftery D.: Anal. Chem. **89**, 4620–4627 (2017)
21. Duhm J., Gerlach E.: Pflug. Arch. **326**, 254–269 (1971)
22. Kim S.W., Charter R.A., Chai C.J., Kim S.K., Kim E.S.: Paraplegia **28**, 441–447 (1990)
23. Yafarova G.G., Andrianov V.V., Yagudin R.Kh., Shaikhutdinov I.I., Gainutdinov Kh.L.: BioNanoScience **6**, 332–334 (2016)
24. Ellsworth ML.: Acta Physiol. Scand. **168**, 551–559 (2000)

Интегральный однофотонный источник на основе оптических нановолокон

А. А. Шухин, А. А. Калачёв

Лаборатория нелинейной оптики

Экспериментально исследован процесс вытягивания оптических нановолокон. Изготовлена серия нановолокон для наблюдения спонтанного четырёхволнового смешения. По изображениям со сканирующего электронного микроскопа определены их диаметр, длины перетяжки и профиль. Экспериментально реализован однофотонный источник на основе флуоресценции квантовых точек CdSe, размещённых на поверхности нановолокна.

Введение

В настоящее время много внимания уделяется развитию квантовых оптических технологий [1]. Актуальной задачей является разработка методов генерации, передачи и хранения квантовых состояний света, которые являются основным ресурсом при создании, например, квантового интернета [2]. Одним из наиболее перспективных направлений является разработка источников двухфотонных и однофотонных состояний света на основе разнообразных когерентных и нелинейных оптических явлений, таких как спонтанное параметрическое рассеяние (СПР) и спонтанное четырёхволновое смешение (СЧВС) [3]. Последнее, в частности, может наблюдаться в широком классе центросимметричных материалов, обладающих ненулевой кубичной восприимчивостью, к которым относятся широко используемый диоксид кремния (SiO_2) и высоко нелинейный селенид мышьяка (As_2Se_3) [4]. Перспективной системой для наблюдения СЧВС является нановолокно – оптическое волокно диаметром от десятков до сотен нанометров [5], что связано с рядом его особенностей. Во-первых, поскольку нановолокна изготавливаются из стандартных оптических волокон, они идеальным образом встраиваются в существующие телекоммуникационные сети для передачи тех квантовых состояний света, которые в них генерируются. Во-вторых, благодаря малому диаметру нановолокон, в них существенно возрастает эффективность параметрического преобразования за счёт малого поперечного размера взаимодействующих мод электромагнитного поля [6]. В-третьих, поскольку в области перетяжки нановолокна образуется эванесцентное поле, которое эффективно взаимодействует с окружающей средой, то появляется возможность использовать нановолокна в качестве сенсоров [7] и управлять свойствами генерируемых квантовых состояний света, меняя окружение нановолокна. Как показано в работе [8], в суженных волокнах также имеется возможность генерации чистых состояний путём подбора длины волны накачки при заданном диаметре перетяжки нановолокна.

Помимо использования нелинейных оптических явлений, однофотонный источник может быть создан на основе излучения одиночных квантовых объектов: атомов, молекул, квантовых точек [3]. Последние, в частности, могут быть размещены на поверхности нановолокна. В таком случае достигается эффективная генерация одиночных фотонов непосредственно в волоконную моду [9] для дальнейшего использования этого излучения в оптоволоконных сетях передачи данных.

Описанные ниже эксперименты по изготовлению оптических нановолокон и генерации однофотонных состояний на основе квантовых точек на нановолокне были сделаны в Центре фотонных инноваций (Университет электрокоммуникаций, Токио, Япония).

Однофотонный источник на основе флуоресценции квантовых точек на нановолокне

Изготовление нановолокон

Волокна с субволновым диаметром перетяжки изготавливаются из стандартных оптических одномодовых волокон методом нагрева и растяжения [10]. Схематичное изображение установки для вытягивания нановолокна изображено на рис. 1. Стандартное оптическое волокно закрепляется между двумя трансляторами и располагается напротив неподвижного пламени горящей смеси молекулярного кислорода и водорода. Движение трансляторов состоит из двух видов: синхронное смещение относительно пламени (swing), что определяет область нагрева волокна, и увеличение расстояния друг относительно друга (stretching), что определяет длину растяжения волокна (см. рис. 1), и характеризуется четырьмя параметрами: скоростью и расстоянием синхронного смещения трансляторов, скоростью движения трансляторов друг относительно друга и расстоянием между ними. Задавая эти параметры, можно получить адиабатический профиль [11], необходимые диаметр и длину перетяжки суженного оптического волокна.

В процессе вытягивания измерялся коэффициент пропускания нановолокна в зависимости от времени (рис. 2). Данная зависимость обладает тремя характерными участками: 1) область первого падения пропускания (50–70

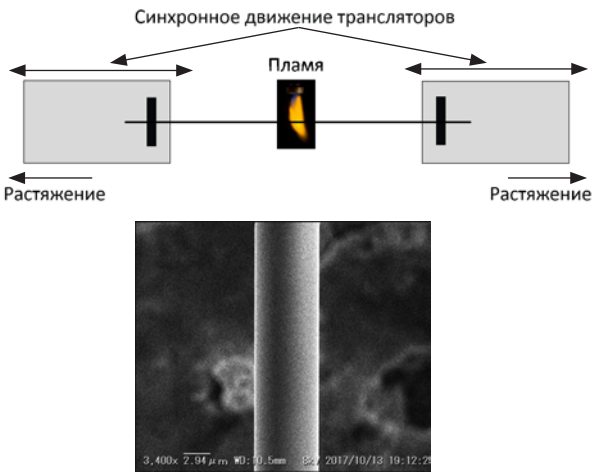


Рис. 1. Схема изготовления суженных оптических волокон и изображение нановолокна, полученное с помощью сканирующего электронного микроскопа.

с), характеризующего многомодовые потери; 2) промежуточная область (70–290 с), связанная с переходом фундаментальной моды из ядра в оболочку оптоволокна при его сужении; 3) область последнего падения пропускания (290–350 с), характеризующего одномодовые потери. Пропускание изготовленных в настоящей работе нановолокон $T \approx 99.6\%$.

После того, как нановолокно было изготовлено, на его поверхность были помещены одиночные квантовые точки.

Генерация однофотонных состояний

Схема эксперимента по генерации однофотонных состояний одиночными квантовыми точками, расположенными на поверхности нановолокна, показана на рис. 3а. Излучение неодимового лазера с длиной волны $\lambda = 532$ нм фокусируется линзой оптического микроскопа на квантовую точку ортогонально оси нановолокна. Излучение флуоресценции с центральной длиной волны

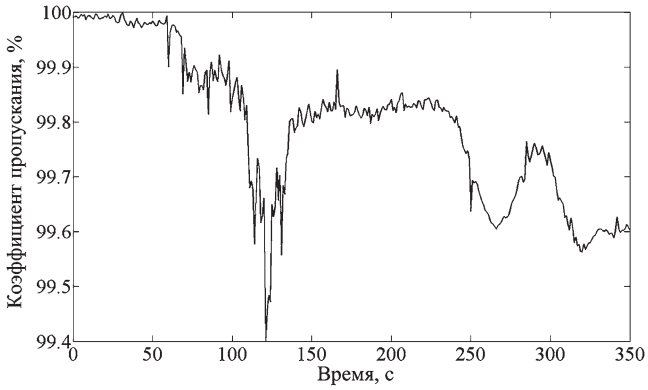


Рис. 2. Зависимость коэффициента пропускания волокна от времени в процессе вытягивания.

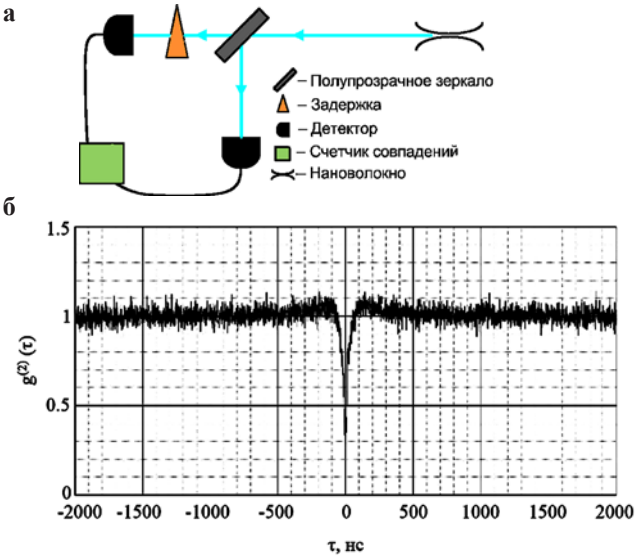


Рис. 3. а Схема интерферометра Брауна-Твисса; **б** результат измерения автокорреляционной функции второго порядка.

$\lambda = 646$ нм заводится в волокно за счёт связывания через эванесцентное поле. После этого, излучение, прошедшее через полупрозрачное зеркало, детектируется в схеме интерферометра Брауна-Твисса с помощью двух детекторов, что позволяет измерить автокорреляционную функцию поля второго порядка $g^{(2)}(\tau)$. Если на входе светоделителя имеется однофотонное состояние, то срабатывает только один из двух детекторов, и при нулевой задержке между каналами совпадений фотоотсчётов на детекторах не будет, что соответствует равенству нулю автокорреляционной функции $g^{(2)}(0) = 0$. Если же фотонов на входе светоделителя оказывается больше, чем один, то автокорреляционная функция при нулевой задержке становится отличной от нуля. Такая ситуация возможна, например, при детектировании излучения от нескольких квантовых точек. В случае когерентного (классического) состояния поля значение автокорреляционной функции равно 1, причём это значение не зависит от интенсивности излучения. Результаты описанных измерений приведены на рис. 3б. Значение автокорреляционной функции при нулевой задержке между двумя каналами в нашем случае составила величину порядка 0.25, что соответствует существенному отличию от классического состояния и повышенному вкладу однофотонного состояния в регистрируемое поле излучения.

Однофотонный источник на основе СЧВС в нановолокне

Коррелированные пары фотонов (бифотоны), генерируемые в процессе СЧВС, могут быть использованы для создания однофотонного источника с оповещением аналогично тому, как это делается в схемах, основанных на СПР [12]. При этом один фотон из коррелированной пары (сигнальный) посылается на детектор, при сраба-

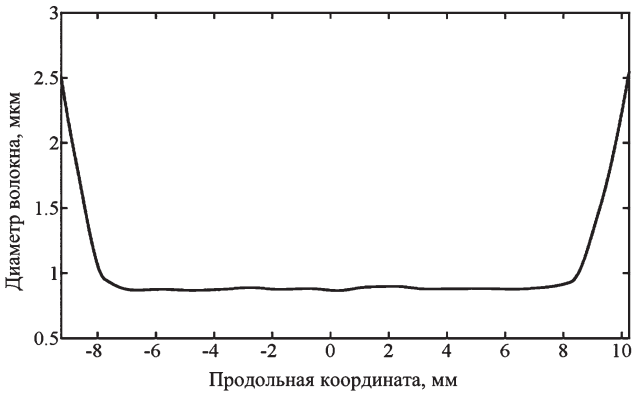


Рис. 4. Зависимость диаметра волокна от продольной координаты.

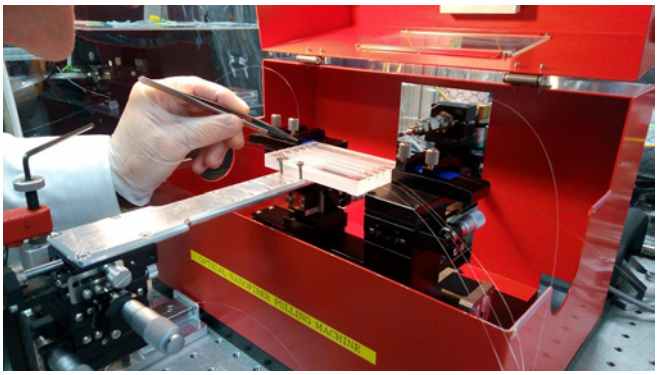


Рис. 5. Общий вид экспериментальной установки для вытягивания нановолокон и процесс помещения нановолокон в защитный бокс.

тывании которого открывается затвор для второго фотона (холостого). Таким образом, на выходе устройства получается однофотонное состояние с оповещением. При этом, спектральная яркость СЧВС, аналогично яркости СПР, пропорциональна квадрату длины нелинейной среды [12]. По этой причине необходимо изготовить нановолокно как можно большей длины.

Расчёты показывают, что в случае излучения накачки на длине волны 1064 нм с целью выполнения условий фазового синхронизма для генерации пар фотонов в сильно невырожденном режиме СЧВС, когда длина волны холостого фотона лежит в области прозрачности кварцевых волокон, а сигнального – в видимой области спектра, где достигается высокая чувствительность фотодетекторов, необходимо изготовить нановолокно с диаметром $D \approx$ 900 нм. В ходе командировки были изготовлены нановолокна, имеющие диаметр $D \approx 890 \pm 12$ нм и длину перетяжки $L \approx 14$ мм (рис. 4). Волокна были помещены в бокс (рис. 5) для защиты от пыли и транспортировки в КФТИ для выполнения дальнейших экспериментов по наблюдению в них СЧВС.

Авторы благодарят профессора Кохзо Хакута (Kohzo Hakuta) за предоставленную возможность проведения экспериментов в Центре фотонных инноваций (Университет электрокоммуникаций, Токио, Япония), а также его коллег R. Yalla и J. Keloth за помощь в проведении экспериментов. Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 15-02-05478).

Литература

1. O'Brien J.L.: Nature Photonics **3**, 687–695 (2009)
2. Kimble H.J.: Nature **453**, 1023–1030 (2008)
3. Eisaman M.D.: Rev. Sci. Instrum. **82**, 071101 (2011)
4. Xiong C. et al.: Applied Physics Letters **98**, 051101 (2011)
5. Brambilla G.: J. Optics **12**, 043001 (2010)
6. Wu X., Tong L.: Nanophotonics **2**, 407–428 (2013)
7. Polynkin P. et al.: Optics Lett. **30**, 1273–1275 (2005)
8. Шухин А.А., Калачёв А.А.: Известия РАН. Серия физическая **80**, 861–864 (2016)
9. Yalla R. et al.: Phys. Rev. Lett. **109**, 063602 (2012)
10. Tong L. et al.: Optics Commun. **285**, 4641–4647 (2012)
11. Ward J.M. et al.: Rev. Sci. Instrum. **85**, 111501 (2014)
12. Калачёв А.А.: Спонтанное параметрическое рассеяние и задачи квантовой информатики. Казань: Казан. ун-т 2012.

Наблюдение методом спектральной эллипсометрии аморфного кремния, облучённого низкими дозами ионов серебра

В. В. Базаров, В. И. Нуждин, В. Ф. Валеев, А. Л. Степанов

Отдел радиационных воздействий на материалы, лаборатория радиационной физики;
отдел когерентной и нелинейной оптики, группа нанооптики и наноплазмоники

Представлены результаты исследований методом спектральной эллипсометрии (СЭ) аморфного кремния (a-Si), сформированного на поверхности монокристаллической подложки (c-Si) низкодозовой низкоэнергетической имплантацией ионов серебра. Имплантация проводилась с энергией 30 кэВ и плотностью тока в ионном пучке (0.1–5) мкА/см^2 в интервале доз ($6.24 \cdot 10^{12}$–$1.3 \cdot 10^{16}$) ион/см^2. Впервые обнаружен эффект нелинейного увеличения скорости генерации дефектов с увеличением плотности ионного тока.

Введение

Известно, что одним из перспективных способов образования пористого кремния с включениями наночастиц металлов является низкоэнергетическая высокодозная ионная имплантация [1, 2]. При этом очевидно, что процесс зарождения и роста пор в кремнии при его облучении сопровождается его аморфизацией, которая начинается почти сразу после начала имплантации. Как было показано ранее на примере c-Si, имплантированного различными типами ионов в широком интервале энергий ([3–8] и ссылки в этих работах), спектроскопическая эллипсометрия (СЭ) является информативным методом изучения частично аморфизованных полупроводниковых слоёв. Этот метод оказывается достаточно эффективным на практике, поскольку оптические константы a-Si и c-Si различаются в видимом диапазоне длин волн.

Интерес к процессу формирования структурных радиационных дефектов в c-Si при низкоэнергетической имплантации тяжёлыми ионами (с массой, заметно превышающей массу атома Si) обусловлен возможностями формирования каскадов атомных столкновений с плотностями, намного превышающими плотности каскадов, возникающих в случае имплантации лёгких ионов. Для экспериментального описания радиационных дефектов, генерируемых при ионной имплантации, и оценки их распределения по глубине обычно применяется метод спектроскопии обратного Резерфордовского рассеяния (ОРР) [9, 10]. Отметим при этом, что глубина проникновения тяжёлых ионов с энергиями порядка 30 кэВ сравнительно невелика (десяток нанометров), поэтому использование метода ОРР для характеризации таких тонких слоёв малоинформативно. Исключение составляет ОРР с высоким разрешением [11, 12], но такой специфический метод является некоторым исключением и трудно реализуемым на практике.

Известно, что процесс аморфизации c-Si при ионной имплантации зависит как от температуры подложки, так и от плотности ионного тока. Эти явления изучаются с 1970-х годов [13, 14] и по-прежнему представляют интерес для исследователей [10]. В настоящей работе метод СЭ предлагается использовать для исследования процесса аморфизации c-Si при его имплантации тяжёлыми ионами Ag с низкой энергией 30 кэВ для различных доз имплантации, плотностей тока в ионном пучке и температур подложки.

Методики эксперимента

Объектами экспериментов СЭ служили монокристаллические c-Si-подложки с ориентацией (100), имплантированные $^{108}Ag^+$ ионами с энергией $E = 30$ кэВ в интервале доз $D = 6.24 \cdot 10^{12}$–$1.25 \cdot 10^{16}$ ион/см^2 с плотностями тока в ионном пучке J от 0.1 до 5 мкА/см^2. Имплантация проводилась на ускорителе ионов ИЛУ-3 при остаточном вакууме 10^{-5} торр.

Оптический анализ имплантированных слоёв Si проводился с помощью спектроскопического эллипсометра ES-2 с бинарной модуляцией поляризации на длинах волн 380–820 нм, со спектральным разрешением 6 нм, размером шага во время измерений 10 нм и углом падения светового луча $\Psi = 70°$. Особенности работы эллипсометра ES-2 описаны в работе [15].

В настоящем исследовании для анализа экспериментальных спектральных зависимостей была выбрана оптическая модель изотропной гетерогенной тонкой плёнки, состоящей из смеси кристаллической (c-Si) и аморфной (a-Si) фаз на монокристаллической подложке c-Si. Подгоночными параметрами в рамках этой модели служили толщина имплантированного слоя (d_{exp}), содержание аморфной фазы a-Si в имплантированном слое – фактор заполнения (f) и толщина слоя естественного окисла SiO_2 на поверхности образца (d_{SiO_2}). Определение оптических констант – показателей преломления и поглощения n и k имплантированного слоя в зависимости от содержания фазы a-Si проводилось в соответствии с приближением эффективной среды по модели Броггемана. Вычисленные

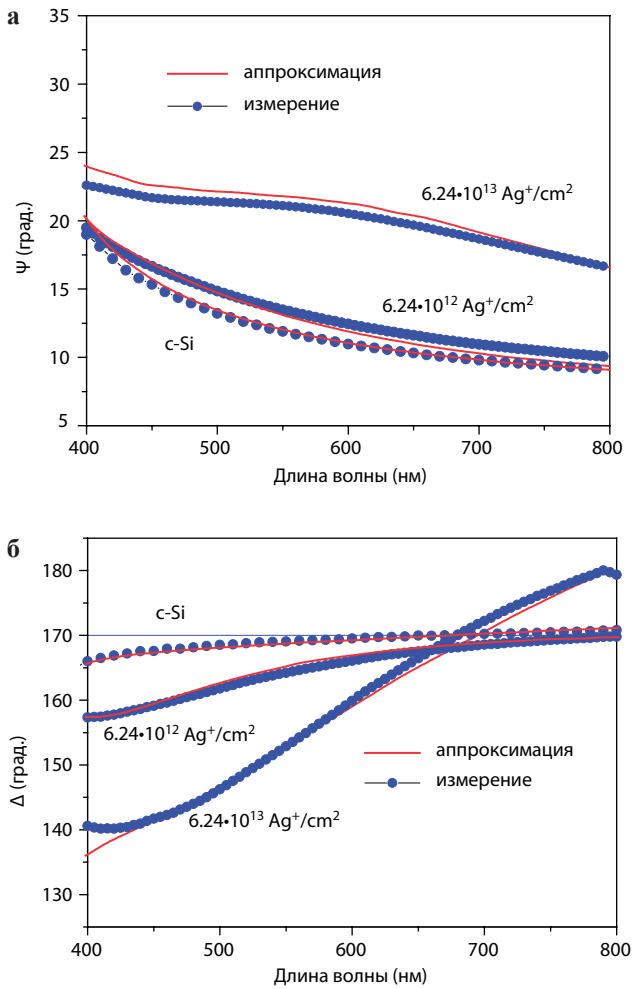


Рис. 1. Измеренные (•) и рассчитанные (-) Ψ(λ) (**а**) и Δ(λ) (**б**) спектры для необлучённого образца c-Si (d_{SiO_2} ~ 3.5 нм) и образцов, имплантированных дозами $6.24 \cdot 10^{12}$ ион/см^2 (d_{SiO_2} ~ 4 нм, f ~ 0.1) и $6.24 \cdot 10^{13}$ ион/см^2 (d_{SiO_2} ~ 1.5 нм, f = 0.9).

спектральные зависимости эллипсометрических углов Ψ_{th} (λ) и Δ_{th} (λ), полученные путём вариации переменных d_{exp}, d_{SiO_2} и f, сопоставлялись с экспериментальными значениями Ψ_{exp}(λ) и Δ_{exp} (λ) для получения наилучшего их совпадения (рис. 1).

Было обнаружено, что значение d_{SiO_2} составляет порядка 1–4 нм для всех имплантированных образцов. Результаты для d_{exp} и f представлены в следующем разделе.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Для первоначальной оценки толщины имплантированного слоя были проведены расчёты в программе компьютерного моделирования торможения ионов в веществе SRIM-2011 [16]. Моделирование показало, что в начальный период облучения атомы Ag накапливаются вблизи поверхности Si с максимумом статистического распределения Гаусса на глубине R_p ~ 23.4 нм. Распределение имеет среднеквадратичное отклонение Δ_{Rp} ~ 7.1 нм. Тогда толщина слоя,

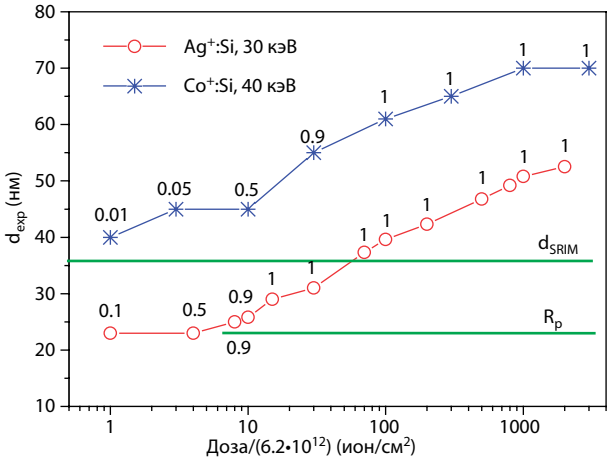


Рис. 2. Зависимость толщины имплантированного слоя от дозы имплантации ионов $^{108}Ag^+$, $^{59}Co^+$ по результатам СЭ. Рядом с символами указан коэффициент заполнения аморфной фазы f. J около 2 мкА/см^2.

содержащего все атомы серебра, может быть оценена как $d_{SRIM} = R_p + 2\Delta_{Rp}$ ~ 38 нм.

Масса атома ^{108}Ag значительно превосходит массу атома ^{28}Si. Количество атомов Si, смещённых из их положений равновесия в кристаллической решётке на один падающий ион Ag^+, может быть рассчитано по модели Кинчина-Пиза [17], которая для энергии смещения одного атома из положения равновесия, равной 13 эВ, даёт значение ~1100 Si-смещений. Принимая во внимание значение R_p ~ 23.4 нм, можно заключить, что аморфизация Si происходит по гетерогенному механизму, согласно которому аморфный слой формируется в результате перекрытия отдельных локальных разупорядоченных областей, образующихся при падении ионов Ag^+.

Результаты СЭ-измерений имплантированных ионами образцов c-Si показаны на рис. 2. Из рисунка видно, что при увеличении дозы имплантации ионов Ag^+ от $6.24 \cdot 10^{12}$ до $6.24 \cdot 10^{13}$ ион /см^2 содержание a-Si в поверхностном имплантированном слое с d_{exp} ~ 23–25 нм постепенно увеличивается до состояния полной аморфизации (f = 1).

Для объяснения полученного значения толщины аморфицации Si, необходимо рассмотреть потери энергии падающих ионов, которые расходуются на смещение атомов в решётке матрицы. Теоретическое рассмотрение [16 и ссылки в этой работе] показало, что максимум распределения потерь энергии и, следовательно, максимум начального распределения точечных дефектов лежит на глубине около $0.8R_p$ от поверхности образца.

При увеличении дозы имплантации D до $6.24 \cdot 10^{15}$ ион/см^2 d_{exp} возрастает до 55 нм. В результате отдачи атомов Si при имплантации толщина аморфного слоя оказывается несколько больше по сравнению с расчётной толщиной d_{SRIM}, определяемой моделируемым профилем атомов Ag.

Для сравнения на том же рис. 2 представлена зависимость $d_{exp}(D)$ для c-Si, имплантированного ионами $^{59}Co^+$ с энергией 40 кэВ, приведённая из работы [5]. Видно,

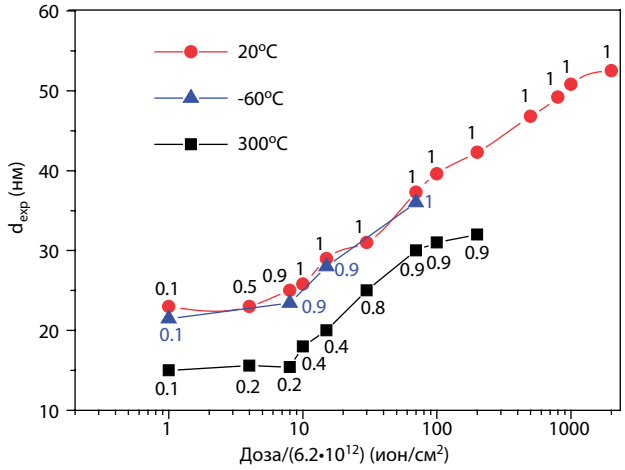


Рис. 3. Зависимость $d_{exp}(D)$ для различной температуры подложки c-Si: 20, –60 и 300 °C, по результатам СЭ. Рядом с символами указано содержание в имплантированном слое аморфного кремния *f*. *J* около 2 мкА/см^2.

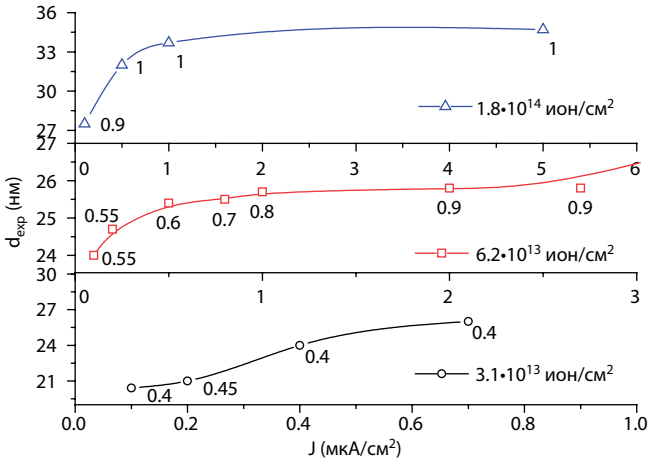


Рис. 4. Зависимость толщины аморфизованного слоя кремния от плотности ионного тока для трёх доз имплантации ионов Ag^+ по данным СЭ. Рядом с символами указано содержание в слое аморфной фазы кремния *f*.

что в данном случае полная аморфизация происходит при дозе $3 \cdot 10^{13}$ ион/см^2, а толщина имплантированного слоя в исследуемом диапазоне доз на ~20 нм больше чем в случае имплантации ионов Ag. Наблюдаемые различия в толщинах аморфных слоёв объясняются меньшей массой ионов Co^+ и, следовательно, большим проекционным пробегом ионов Co^+ в Si кремнии по сравнению со случаем ионов Ag.

На рис. 3 показана зависимость $d_{exp}(D)$ имплантированного слоя для трёх различных температур подложки при имплантации ионов Ag^+. При температуре имплантации –60 °C оптические эллипсометрические характеристики имплантированных слоёв почти такие же, как у слоёв, сформированных в образцах, имеющих комнатную температуру. Это означает, что охлаждение подложки до –60 °C не изменяет процессы дефектообразования по сравнению с условиями комнатной температуры. При имплантации ионов Ag^+ в нагретые до 300 °C образцы величина d_{exp} уменьшается на 7–9 нм, и содержание a-Si в слое *f* также снижается для всех доз имплантации. Это связано с диффузией и отжигом отдельных элементарных дефектов при имплантации в подогретую подложку. Важным является вопрос, какие именно дефекты не выживают при 300 °C. В работе [18] описано наблюдение генерации и отжига отдельных аморфных областей в кремнии, возникающих в результате имплантации ионов Xe^+ с энергией 200 кэВ, методом просвечивающей электронной микроскопии *in situ*. Показано, что перекристаллизация аморфных зон нанометрового размера не является однократно активированным процессом, а происходит в широком диапазоне температур. Дефекты, ответственные за перекристаллизацию, не были идентифицированы, но в качестве возможных кандидатов предложены оборванные связи и вакансии.

На рис. 4 показаны результаты СЭ для c-Si, имплантированного ионами Ag^+ с дозой $3.1 \cdot 10^{13}$, $6.2 \cdot 10^{13}$ и $1.8 \cdot 10^{14}$ ион/см^2 при разных плотностях в ионном пучке *J*. Видно, что для максимальной дозы $1.87 \cdot 10^{14}$ ион/см^2 содержание аморфной фазы *f* не зависит от плотности *J* в диапазоне 0.5–5 мкА/см^2. Для доз $3.1 \cdot 10^{13}$ и $6.24 \cdot 10^{13}$ ион/см^2 наблюдается монотонное увеличение как d_{exp}, так и коэффициента заполнения *f* с увеличением *J*. Это так называемый эффект нелинейного повышения эффективности накопления структурных дефектов с увеличением мощности дозы. Для объяснения этого эффекта существует несколько моделей.

Чтобы вычислить траекторию иона в веществе, обычно используется приближение парных столкновений (ППС). В этой модели ион, двигаясь сквозь решётку, испытывает последовательность независимых столкновений с атомами в решётке. При этом количество первичных точечных дефектов, созданных в результате такого движения, прямо пропорционально энергии, выделенной при их формировании в упругих столкновениях, и не зависит от плотности ионного тока [16, 19]. Однако, при попадании в кремний тяжёлого иона, плотность смещений оказывается столь большой, что вокруг его траектории сразу формируется полностью разупорядоченная область. При этом расстояние между образуемыми дефектами может приближаться к межатомному. В этом случае столкновения нельзя более рассматривать как независимые, условие парности столкновений перестаёт выполняться, понижается энергетический барьер для выбивания из решётки следующих атомов. Полное количество выбитых атомов с увеличением плотности ионного тока нелинейно возрастает и формируется пик смещений. Локальное повышение температуры мишени в области трека иона также может приводить к её плавлению и сверхбыстрому застыванию в аморфном состоянии [20] и, следовательно, к усиленному накоплению радиационных повреждений. Появление такого теплового пика, как правило, происходит при остановке иона, после формирования пика смещений. С другой стороны, по мере

увеличения плотности смещений первичных атомов в каскаде нелинейные процессы становятся возможными и внутри него в процессе его развития. Фактически, в этом случае столкновения смещённых атомов могут зависеть друг от друга, и в результате число смещённых атомов оказывается больше, чем предсказывается моделью ППС.

Например, в [21] были исследованы образцы c-Si после облучение 1.5 МэВ Xe^+-ионами дозой $5 \cdot 10^{15}$ ионов/см^2 с различными плотностями ионного тока. Плотность ионного тока аморфизации, определяемая как минимальная плотность тока, необходимая для генерации сплошного аморфного слоя, измерялась с использованием метода ОРР как функция температуры образца при облучении. Было обнаружено, что критический J аморфизации удовлетворяет выражению Аррениуса с энергией активации 1.2 эВ, которая соответствует энергии миграции/диссоциации кремниевых дивакансий. Таким образом, сделан вывод о том, что существует конкуренция между генерацией дефектов и их динамическим отжигом, а устойчивость дивакансий кремния обеспечивает температурную зависимость плотность ионного тока аморфизации кремния при ионной имплантации.

Выводы

В заключение, в настоящей работе для структурного анализа поверхностных слоёв c-Si, имплантированных малыми дозами ионов Ag^+, использовался метод СЭ. Показано, что при дозе $6.24 \cdot 10^{13}$ ион/см^2, вблизи поверхности c-Si образуется слой a-Si толщиной $d_{exp} \sim 25$ нм. При увеличении дозы имплантации до $6.24 \cdot 10^{15}$ ион/см^2, толщина аморфного слоя увеличивается до 55 нм. Нагревание образца при имплантации до 300 °C приводит к уменьшению d_{exp} и коэффициента заполнения f. Для доз $3.1 \cdot 10^{13}$ и $6.24 \cdot 10^{13}$ с увеличением J наблюдается монотонное увеличение как d_{exp}, так и коэффициента заполнения f имплантированных слоёв. Последние эффекты являются результатом повышения эффективности генерации фазы a-Si с увеличением плотности каскадов атомных столкновений. Показано, что СЭ является удобной неразрушающей методикой, которая может быть использована для оценки параметров поверхности материалов, подвергнутых ионной имплантации.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 17-12-01176.

Литература

1. Stepanov A.L., Nuzhdin V.I., Valeev V.F., Osin Yu.N.: A Method for Fabricating Porous Silicon, Patent RF No. 2547515 (2015)
2. Stepanov A.L., Nuzhdin V.I., Valeev V.F., Vorobev V.V., Kavetskyy T.S., Osin Y.N.: Rev. Adv. Mater. Sci. **40**, 155–164 (2015)
3. Petrik P., Polga O., Fried M., Lohner T., Khanh N.Q., Gyulai J.: J. Appl. Phys. **93**, 1987–1990 (2003)
4. Shamiryan D., Likhachev D.V.: Ion Implantation (M. Goorsky, ed.), pp. 89–104. InTech 2012.
5. Bazarov V.V., Valeev V.F., Nuzhdin V.I., Osin Y.N., Gumarov G.G., Stepanov A.L.: Solid State Phenom. **233**, 526–529 (2015)
6. Bazarov V.V., Nuzhdin V.I., Valeev V.F., Vorobev V.V., Osin Yu.N., Stepanov A.L.: J. Appl. Spectr. **83**, 47–50 (2016)
7. Tsunoda K., Adachi S., Takahashi M.: J. Appl. Phys. **91**, 2936–2941 (2002)
8. Kurihara K., Hikino S., Adachi S.: J. Appl. Phys. **96**, 3247–3254 (2004)
9. Karabeshkin K.V., Karaseov P.A., Titov A.I.: Semiconductors **47**, 242–246 (2013)
10. Karabeshkin K.V., Karaseov P.A., Titov A.I.: Semiconductors **12**, 989–995 (2016)
11. Kimura K., Oota Y., Nakajima K., Suzuki M., Aoki T., Matsuo J., Agarwal A., Freer B., Stevenson A., Ameen M.: Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B **211**, 206–210 (2003)
12. Kimura K., Joumori S., Oota Y., Nakajima K., Suzuki M.: Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B **219–220**, 351–357 (2004)
13. Morehead F.F., Crowder B.L., Title R.S.: J. Appl. Phys. **43**, 1112–1118 (1972)
14. Gibbons J.: Proc. IEEE **60**, 1062–1096 (1972)
15. Khomich A.V., Kovalev V.I., Zavedeev E.V., Khmelnitskiy R.A., Gippius A.A.: Vacuum **78**, 583–587 (2005)
16. Ziegler J.F., Biersack J.P., Ziegler M.D.: SRIM. The Stopping and Range of Ions in Matter. SRIM Company 2008.
17. Ryssel H., Ruge I.: Ion Implantation. Wiley 1986.
18. Donnelly S.E., Birtcher R.C., Vishnyakov V.M., Carter G.: Appl. Phys. Lett. **82**, 1860–1862 (2003)
19. Averback R.S., Diaz de la Rubia T.: Solid State Physics – Advances in Research and Applications **51(C)**, 281–402 (1997)
20. Thompson D.A.: Rad. Eff. **56**, 105–150 (1981)
21. Elliman R.G., Linnros J., Brown W.L.: Mat. Res. Soc. Symp. Proc. **100**, 363–368 (1988)

Микроскопия поверхности кремния, имплантированного ионами серебра

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

Отдел когерентной и нелинейной оптики, группа нанооптики и наноплазмоники;
отдел радиационных воздействий на материалы, лаборатория радиационной физики

Проведено исследование по низкоэнергетической высокодозовой имплантации ионами Ag^+ пластин монокристаллического c-Si с энергией E = 30 кэВ при дозах облучения от $1.25 \cdot 10^{15}$ до $1.5 \cdot 10^{17}$ ион/см^2 и плотности тока в ионном пучке 8 мкА/см^2. С помощью сканирующей электронной микроскопии исследована морфология поверхности имплантированных образцов, а также проанализирован их элементный состав. Установлена пороговая доза ионной имплантации ~$3.1 \cdot 10^{15}$ ион/см^2 для данной энергии, при которой образуются наночастицы Ag, однородно распределённые по поверхности Si. Обнаружено, что при превышении пороговой дозы облучения, функция распределения наночастицы Ag по размерам становится бимодальной.

Введение

Исследования по поиску новых материалов и технологий создания на их основе полупроводниковых приборов, в том числе на Si наноструктурах, для использования в промышленной микроэлектронике являются актуальными в настоящее время. Одним из перспективных материалов является пористый Si (PSi), который на практике в большинстве случаев получают методом электрохимического травления монокристаллического c-Si в растворах плавиковой кислоты [1, 2]. Однако, помимо химического подхода в индустрии, также рассматривается и технология формирования пористых полупроводниковых слоёв с помощью имплантации Si различными типами ионов в вакууме [3]. В целом PSi представляет интерес для его использования в области микро-, нано- и оптоэлектроники, в частности, для создания солнечных элементов, а также в приложениях биосенсорики [4].

На практике активно ведутся поиски создания композиционных материалов на основе PSi, содержащие наночастицы благородных металлов: Au [5], Pt [6] и Ag [7]. Задачей данного направления является повышение эффективности проявления оптических свойств PSi. Коллективное возбуждение электронов проводимости в металлических наночастицах под действием электромагнитной волны света вызывает резонансное усиление локального поля (поверхностный плазмонный резонанс), что ведёт к стимулированию оптических и нелинейно-оптических эффектов в композиционных материалах [8, 9]. В частности, наличие наночастиц Ag в структуре Si может способствовать повышению эффективности функционирования солнечных элементов за счёт изменения их поглощательной способности на частотах плазмонного резонанса наночастиц [10, 11], а также фотогенерации электронов, возникающих в наночастицах и диффундирующих через барьер Шотки на границе металла и полупроводника [12]. Кроме того, плазмонное поле наночастицы Ag приводит к повышению фотолюминесценции квантовых точек [13] и усилению комбинационного рассеяния света органических соединений [14], нанесённых на PSi.

Ранее для формирования PSi с наночастицами серебра (Ag:PSi) было предложено использовать низкоэнергетическую высокодозовую имплантацию c-Si ионами Ag^+ [15, 16]. Цель настоящей работы заключается в определении методами сканирующей электронной микроскопии порогового значения дозы имплантации, при которой происходит зарождение и формирование наночастиц Ag в матрице Si.

Методика эксперимента

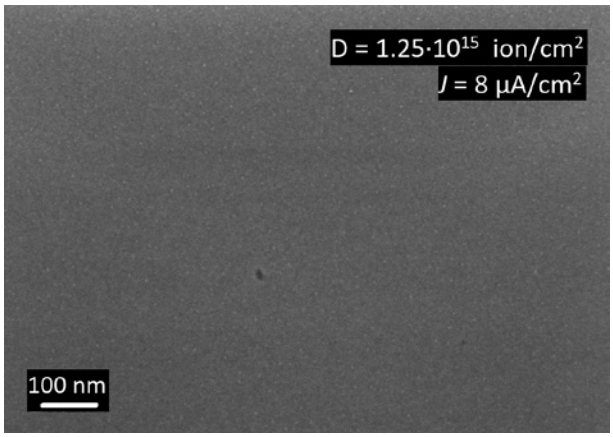
Монокристаллические c-Si пластины с кристаллографической ориентацией (100) p-типа проводимости использовались для иной имплантации. Облучение проводилось ионами Ag^+ с энергией E = 30 кэВ при дозе облучения (D) от $1.25 \cdot 10^{15}$ до $1.5 \cdot 10^{17}$ ион/см^2 и плотности тока в ионном пучке (J) 8 мкА/см^2 на ионном ускорителе ИЛУ-3 при комнатной температуре облучаемой подложки.

Поверхность образцов исследовалась на автоэмиссионном сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) Merlin (Carl Zeiss) при ускоряющем напряжении (U_{acc}) нормально падающего на образец электронов зондирующего пучка 5 кэВ, рабочим расстоянии между объективной линзой и поверхностью образца (WD) 2 мм и токе зонда (I_{prob}) 300 пА в режиме детектирования вторичных электронов используя внутрилинзового детектора In-Lens. Элементный анализ регистрировался с помощью энергодисперсионного (ЭДС) спектрометра X-Max (Oxford Instruments) при следующих параметрах работы СЭМ: U_{acc} = 20 кэВ, WD = 9.6 мм и I_{prob} = 600 пА, при нормальном падении электронного зонда на образец. Изображения поперечного сечения образцов регистрировались на просвечивающих электронных микроскопах (ПЭМ) HT 7700 Excellence (Hitachi) и JEM-2100 (JEOL). Для этого с помощью ультразвукового резака из облучённого образца вырезался тонкий слой, подвергаемый ионному травлению.

Результаты и обсуждение

Ранее в работах [15, 16] была показана принципиальная возможность синтеза наночастиц Ag при низкоэнергетической высокодозовой (>10^{17} ион/см^2) имплантации c-Si. Для определения пороговой величины D ионами Ag^+ в Si для энергии 30 кэВ, при которой происходит зарождение металлических наночастиц, в настоящей работе были проведены СЭМ-наблюдения образцов, сформированных для различных значений D от $1.25 \cdot 10^{15}$ до $1.5 \cdot 10^{17}$ ион/см^2, при постоянных параметрах ионной имплантации E = 30 кэВ и J = 8 мкА/см^2.

Как следует из СЭМ-наблюдений (рис. 1а) при облучении с наименьшей $D = 1.25 \cdot 10^{15}$ ион/см^2 на имплантированной поверхности Si какие-либо морфологические неоднородности не появляются, и она остаётся ровной и гладкой, как у исходной подложки. При этом на ЭДС-спектре (рис. 1б) данного образца дополнительно к сигналу подложки Si проявляются пики, расположенные между 2.5 и 3.5 кэВ, которые соответствуют характеристическим линиям серебра. По расчётным данным толщина имплантированного ионами Ag^+ приповерхностного слоя Si составляет порядка 40 нм [15], что заведомо меньше глубины зондирования образца электронами (~1 мкм) при ЭДС. Из этого можно заключить, что при ЭДС измерении анализируется все вещество серебра, имплантированное в Si. Отсутствие видимых морфологических изменений на поверхности образца при ионном облучении Si для $D = 1.25 \cdot 10^{15}$ ион/см^2, указывает на то, что Ag в приповерхностном слое Si находится в атомарном состоянии.



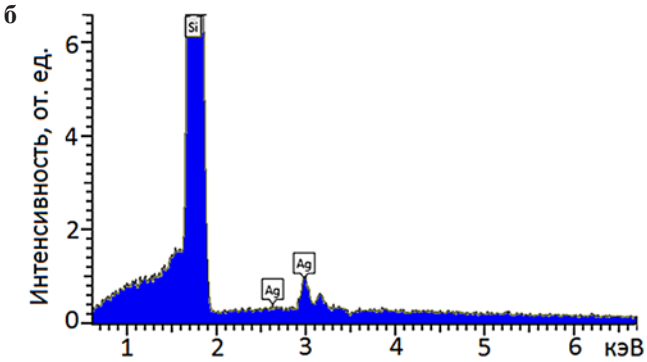


Рис. 1. СЭМ-изображение (**а**) и ЭДС-спектр (**б**) поверхности Si, имплантированного ионами Ag^+ при $D = 1.25 \cdot 10^{15}$ ион/см^2, E = 30 кэВ и J = 8 мкА/см^2.

Для c-Si, имплантированного ионами Ag^+ при более высокой дозе $D = 3.1 \cdot 10^{15}$ ион/см^2, как видно на СЭМ-изображении (рис. 2а) присутствуют светлые яркие круглые пятна со средним диаметром ~2 нм, однородно распределённые на сером фоне поверхности образца (рис. 1а). Заметим, что при СЭМ-наблюдениях изображение формируется за счёт столкновения электронов с поверхностью анализируемого материала и их отражения при некоторых потерях энергии с регистрацией на детекторе [17]. При этом цветовая тональность на СЭМ-изображении определяется в первую очередь плотностью вещества на поверхности исследуемого материала. Известно также, что Ag не образует химических соединений с Si. Поэтому, очевидно полагать, что образец, показанный на рис. 2а демонстрирует наличие в его приповерхностном слое две различающиеся по плотности и цветовой тональности фазы, а именно серого фона для менее плотного вещества Si, так, и яркие светлые пятна, которые следует относить к синтезированным наночастицам Ag. Отсутствие посторонних примесных химических элементов в данном образце, как было показано, подтверждается ЭДС анализом. Образование наночастиц Ag при данной величине D объясняется накоплением атомов Ag в количествах, превышающих его предел растворимости в Si равным ~10^{16} см$^{-3}$ [18]. При возникновении пересыщения атомы Ag, диффундируя по приповерхностному объёму Si, сегрегируют в металлические наночастицы, аналогично тому, как это происходит в пересыщенных растворах, например, в стёклах и полимерах при их высокодозовой ионной имплантации [15]. Оценённое по СЭМ-изображению (рис. 2а) среднее расстояние между наночастицами составляет ~37 нм, а их плотность по поверхности образца равна $25 \cdot 10^9$ N/см^2, где N – количество частиц (таблица 1). Таким образом D равную ~$3.1 \cdot 10^{15}$ ион/см^2 можно считать пороговой дозой (E = 30 кэВ и J = 8 мкА/см^2) при который зарождаются и формируются устойчивые стабильные наночастицы Ag.

Для образцов, имплантированных при более высоких дозах $D = 2.5 \cdot 10^{16}$ ион/см^2 и $D = 5 \cdot 10^{16}$ ион/см^2, на СЭМ-изображениях на рис. 2б и 2в, соответственно,

Таблица 1. Гранулометрические характеристики ионно-синтезированных наночастиц Ag в приповерхностном слое Si.

Доза имплантации, ион/см^2	Средний диаметр наночастиц, нм	Плотность наночастиц на ед. площади, N/см^2	Среднее расстояние между частицами, нм
$3.1 \cdot 10^{15}$	2	$25 \cdot 10^9$	37
$2.5 \cdot 10^{16}$	3	$39 \cdot 10^9$	32
$5 \cdot 10^{16}$	5	$60 \cdot 10^9$	28

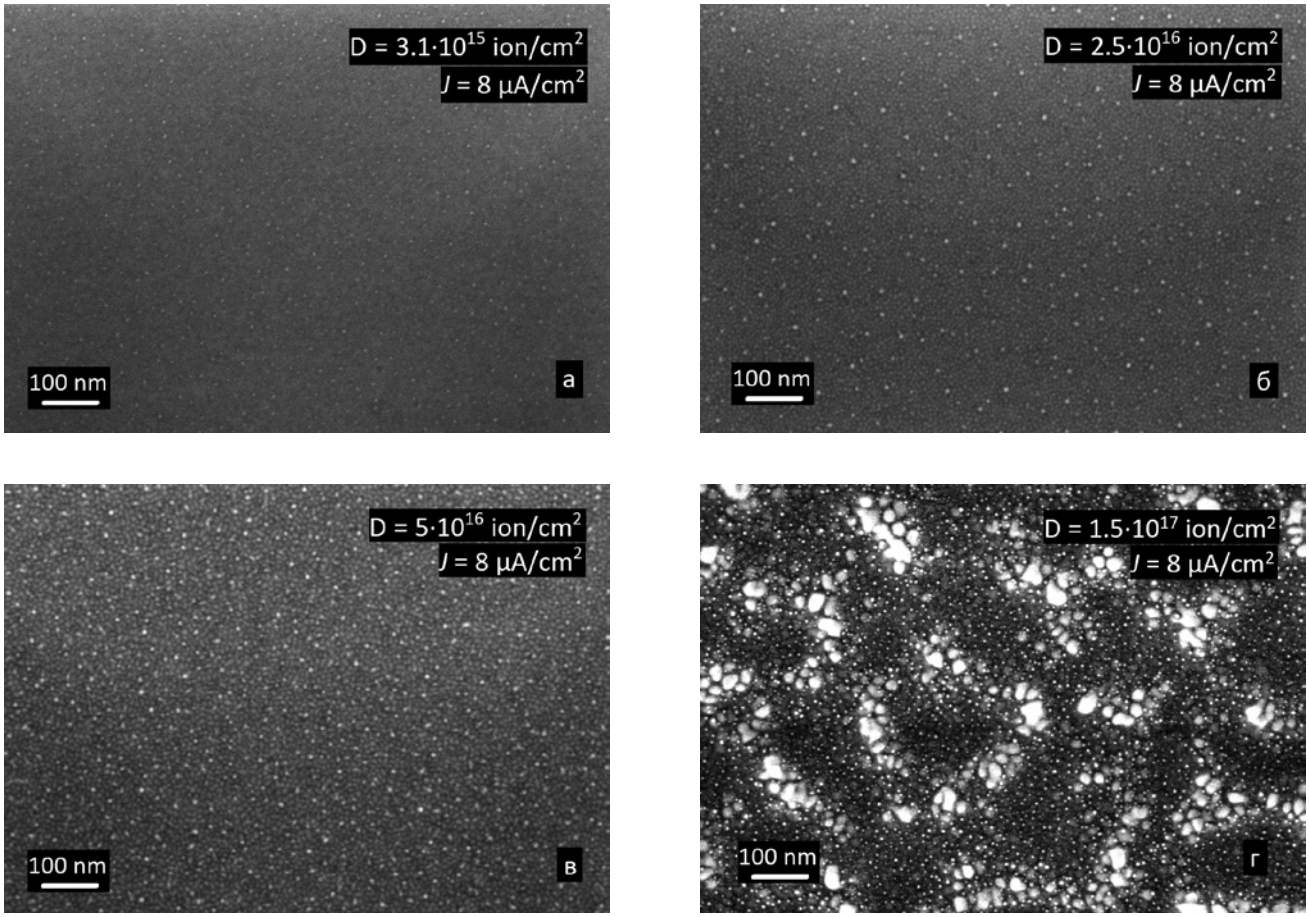


Рис. 2. СЭМ-изображения поверхности Si, имплантированного ионами Ag^+ при J = 8 мкА/см^2 и различных значениях D: **а** $3.1 \cdot 10^{15}$, **б** $2.5 \cdot 10^{16}$, **в** $2.5 \cdot 10^{16}$ и **г** $1.5 \cdot 10^{17}$ ион/см^2.

также наблюдаются светлые пятна наночастиц серебра на сером фоне Si. При этом с ростом D размер наночастиц (3 и 5 нм) и их плотность ($39 \cdot 10^9$ и $60 \cdot 10^9$ N/см^2) увеличивается, а среднее расстояние между ними уменьшается 32 и 28 нм. Таким образом, очевидно, что

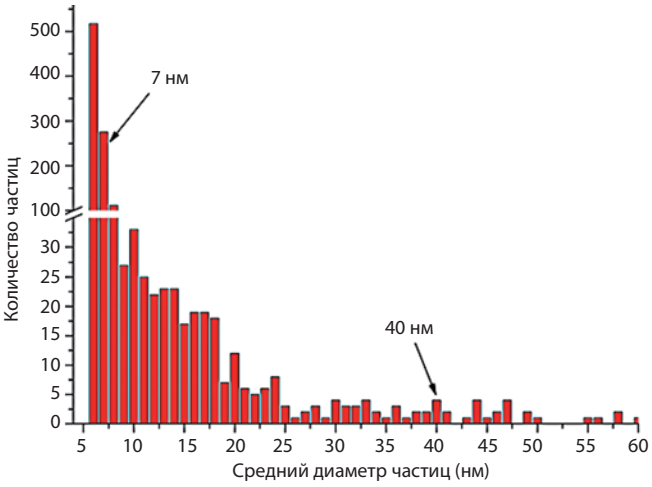


Рис. 3. Распределение частиц по размерам для образца имплантированного ионами Ag^+ при $D = 1.5 \cdot 10^{17}$ ион/см^2, E = 30 кэВ и J = 8 мкА/см^2.

с ростом D поступающие в Si в бóльшем количестве ионы Ag диффундируют к уже сформировавшимся наночастицам Ag (стокам), приводя к увеличению размеров частиц и повышению их поверхностной плотности, как это отражено в таблице 1.

При дальнейшем росте D свыше 10^{17} ион/см^2 происходит увеличение размеров наночастиц Ag и уширение функции их распределения по размерам (рис 3). В качестве примера, на рис. 2г показано СЭМ-изображение поверхности облучённого Si при $D = 1.5 \cdot 10^{17}$ ион/см^2. В данном случае наночастицы Ag условно можно разделить по величине на две группы (бимодальное распределение), т.е. состоящих из наночастиц со средними размерами ~7 нм (мелкие) и ~40 нм (крупные). Данное обстоятельство приводит к тому, что бимодальное распределение наночастиц по поверхности становится неоднородным. Наиболее крупные частицы располагаются по так называемым окружностям со средним диаметром ~180 нм, тогда как мелкие равномерно покрывают всю площадь образца.

На рис. 4 приведены светлопольные ПЭМ-изображения поперечного сечения Si, иплантированного ионами Ag^+ при $D = 1.5 \cdot 10^{17}$ ион/см^2 и J = 8 мкА/см^2. Нижняя часть изображения (рис. 4а) соответствует c-Si подложки,

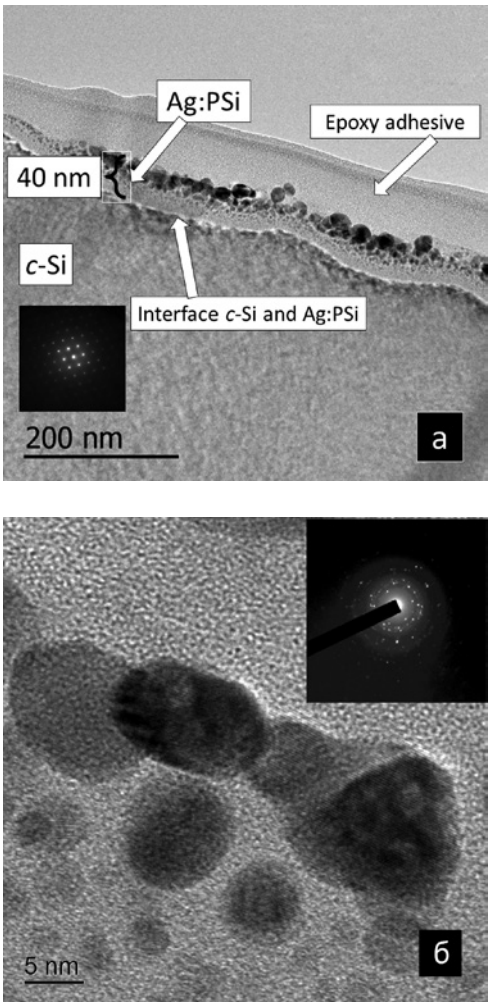


Рис. 4. ПЭМ-изображения поперечного среза приповерхностного слоя Ag:PSi, имплантированного ионами Ag^+ при $D = 1.5 \cdot 10^{17}$ ион/см^2 и J = 8 мкА/см^2: **а** на вставке приведена микродифракция подложки c-Si (HT 7700 Excellence), **б** увеличенное изображение слоя Ag:PSi, на вставке приведена микродифракция от наночастиц Ag (JEM-2100).

кристаллическая структура которой представлена на вставке микродифракции того же рисунка. Выше над необлучённой подложкой c-Si располагается имплантированный слой Ag:PSi толщиной порядка 40 нм. Между подложкой c-Si и Ag:PSi наблюдается тонкий, толщиной ~2 нм слой интерфейса, являющийся переходным между кристаллической и аморфной фазами Si. В слое Ag:PSi вдоль всего среза на верхней его стороне (поверхности образца) наблюдаются ионно-синтезированные наночастицы Ag. Также на поверхности образца, над слоем Ag:PSi присутствуют остатки эпоксидного клея, который использовался при пробоподготовки срезов. На рис. 4б показано увеличенное ПЭМ-изображение имплантированного приповерхностного участка образца с наночастицами Ag. На выбранном локальном участке размеры частиц варьируются от 5 до 20 нм. На вставке рис. 4б показана микродифракция от Ag наночастиц, которая соответствует гранецентрованной кристаллической фазе Ag наночастиц с разной ориентацией.

Выводы

Таким образом, в работе показано, что начиная с $D = 3.1 \cdot 10^{15}$ ион/см^2 происходит зарождение и формирование устойчивых однородных по размеру наночастиц Ag ~ 2 нм. При дальнейшем росте D зафиксировано повышение количества наночастиц, размеры которых увеличиваются от 5 до 50 нм. Начиная с $D = 1.5 \cdot 10^{17}$ ион/см^2 размерное распределение наночастиц Ag становится бимодальным, состоящим из двух фракций: мелкие наночастицы (5–10 нм), располагающиеся равномерно по всему образцу и крупные (40–50 нм), лежащие по периметрам сформированных на Si границам пор.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 17-12-01176). Авторы выражают благодарность М. А. Ермакову из Тихоокеанского государственного университета (г. Хабаровск) за помощь в проведении электронно-микроскопических измерений, Эйдельман К.Б. и Табачковой Н.Ю. из Национального исследовательского технологического университета “МИСиС” за помощь в проведении подготовки проб для просвечивающей электронной микроскопии и измерений на ПЭМ JEM-2100.

Литература

1. Panarin A.Yu., Terekhov S.N., Kholostov K.I., Bondarenko V.P.: Appl. Surf. Sci. **256**, 6969–6976 (2010)
2. Liou Y.-C.V., Chen J.-Y., Yanga J.: App. Spectr. **68**, 172–178 (2014)
3. Козловский В.В., Козлов В.А., Ломасов В.Н.: ФТП **34**, 129–147 (2000)
4. Ищенко А.А., Фетисов Г.В., Асланов Л.А.: Нанокремний: свойства, получение, применение, методы исследования и контроля. 573 с. М.: Физматлит 2011.
5. Amran T.S., Hashim M.R., Al-Obaidi N.K., Yazid H., Adnan R.: Nanoscale Res. Lett. **8**, 35–41 (2013)
6. Wang M., Wang X., Ghoshal S.: Micro & Nano Lett. **8**, 465–469 (2013)
7. Wang Y., Liu Y.P., Liang H.L., Mei Z.X., Du X.L.: Phys. Chem. Chem. Phys. **12**, 2345–2350 (2013)
8. Kreibig U., Volmer M.: Optical properstes of metal clusters. 533 p. Berlin: Springer 1995.
9. Степанов А.Л.: Фотонные среды с наночастицами, синтезированными ионной имплантацией. 353 с. Саарбрюккен: Lambert Acad. Publ. 2014.
10. Atwater H.A., Polman A.: Natur. Materials **9**, 205–213 (2010)
11. Степанов А.Л., Воробьев В.В., Нуждин В.И., Валеев В.Ф., Осин Ю.Н.: ЖПС **85**, 721–730 (2017)
12. Knight M.W., Sobhani H., Nordlander P., Halas N.J.: Science **332**, 702–704 (2011)
13. Галяметдинов Ю.Г., Шамилов Р.Р., Степанов А.Л.: Изв. Акад. наук. Сер. хим. **11**, 2773–2775 (2016)
14. Воробьев В.В., Рогов А.М., Осин Ю.Н., Брандт Н.Н., Нуждин В.И., Валеев В.Ф., Степанов А.Л.: Оптика и спектроскопия (2018) в печати.
15. Stepanov A.L., Trifonov A.A., Osin Y.N., Valeev V.F., Nuzhdin V.I.: Optoelectr. Adv. Mater. Rapid Comm. **7**, 692–697 (2013)
16. Степанов А.Л., Осин Ю.Н., Трифонов А.А., Валеев В.Ф., Нуждин В.И.: Российские нанотехнологии **9**, 53–56 (2014)
17. Жу У., Уанга Ж.Л.: Растровая электронная микроскопия для нанотехнологий. Методы и применение. 600 с. М.: Бином 2014.
18. Глазов В.М., Земсков В.С.: Физико-химические основы легирования полупроводников. 372 с. М.: Наука 1967.

Создание установки для измерения вольтамперных характеристик полупроводниковых элементов

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

Группа информационной безопасности, телекоммуникационных и сетевых технологий; отдел радиационных воздействий на материалы, лаборатория радиационной физики; Отдел когерентной и нелинейной оптики, группа нанооптики и наноплазмонки

Разработана и сконструирована компьютеризованная установка для измерения вольтамперных характеристик полупроводниковых материалов на базе промышленного программируемого источника питания APS-7612. Внесение оригинальных изменений в электронную структуру APS-7612, позволило реализовать в рамках поставленной задачи программное переключение полярности напряжения на его выходных клеммах и осуществить измерение токов, протекающих через образец, в расширенном диапазоне. Процесс измерения вольтамперных характеристик полупроводников при помощи компьютера полностью автоматизирован.

Одной из основных характеристик полупроводникового прибора является его вольтамперная характеристика (ВАХ). Поэтому предпочтительно, чтобы в комплексе экспериментального оборудования, используемого для исследования полупроводниковых материалов, присутствовали научные приборы, позволяющие, в частности, измерять ВАХ.

Для решения подобных задач была разработана и создана оригинальная установка на базе промышленного источника писания APS-7612, позволяющая измерять ВАХ различных полупроводниковых устройств. Используемый в установке программируемый источник питания APS-7612 имеет следующие привлекательные технические характеристики, которые могут быть использованы при ВАХ измерениях:

– Выходное напряжение: 0...60 В;
– Выходной ток: 0...2 А;
– Разрешение установки по напряжению: 10 мВ;
– Разрешение измерения по току: 1 мА;
– Компьютерный интерфейс USB, RS-232.

Рис. 1. Внешний вид модернизированного источника питания APS-7612.

Последовательный компьютерный интерфейс в APS-7612 является двунаправленным и используется как для управления прибором, так и для определения действительных значений напряжения и тока на клеммах источника питания. Поэтому данный источник питания можно условно отнести к классу приборов, называемых “источник-измеритель”. Именно эта конструктивная особенность позволяет модернизировать и использовать на практике APS-7612 для измерений ВАХ и обрабатывать полученные результаты с помощью компьютера.

В целом, прибор для получения ВАХ должен обеспечивать подачу напряжения на анализируемый образец, через сформированные контакты, в прямой и обратной полярности, а также измерение тока в зависимости от напряжения в широком диапазоне с требуемой точностью. Для этого в настоящей работе в источник питания APS-7612 оригинальным способом был встроен микроконтроллерный блок коммутаций на базе отладочной платы Iskra Mini (Arduino).

На рис. 1 показан внешний вид прибора, а на рис. 2 показана упрощённая схема модификации источника питания APS-7612. Переключение полярности напряжения на выходных клеммах прибора реализовано с помощью реле с двумя группами переключающих контактов. Расширение диапазона измерения тока реализовано с помощью

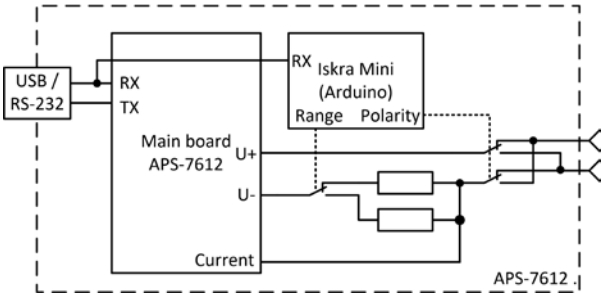


Рис. 2. Схема соединений основных электронных узлов, используемых при модификации источника питания APS-7612.

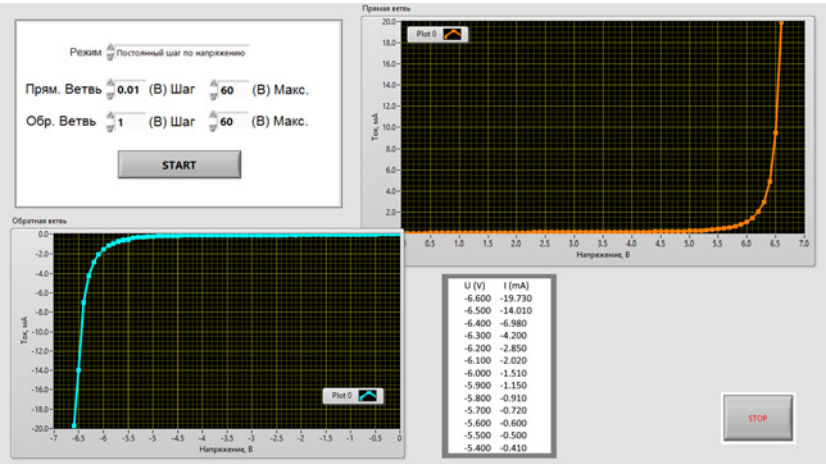


Рис. 3. Окно программы измерения ВАХ.

переключаемых измерительных шунтов, добавленных в схему источника питания при модификации. Управление реле переключения полярности и измерительных шунтов осуществляется микроконтроллером отладочной платы Iskra Mini, получающим специальные команды от компьютера по физическому последовательному интерфейсу источника питания APS-7612.

Характеристики прибора после модификации источника питания:

– Выходное напряжение: 0...±60 В
– Выходной ток: 0...±200 мА
– Разрешение по напряжению: 10 мВ
– Разрешение по току: 1 мкА, 10 мкА, 100 мкА
– Компьютерный интерфейс USB, RS-232

Для работы с прибором создана компьютерная программа, работающая под управлением операционной системы Windows. В ходе измерения ВАХ управляющая программа посылает ВАХ прибору команду на установку изменяемого параметра (напряжение или ток), производит опрос значений напряжения и тока, а результат измерений заносит в таблицу в памяти компьютера. В ходе измерения в окне программы строится график ВАХ. По окончании измерения, полученные данные можно сохранить в виде файла и вывести на внешнее печатающее устройство. На рис. 3 представлено окно программы измерения ВАХ промышленного полупроводникового устройства – симметричного стабилитрона КС162А.

Микроконтроллер блока коммутаций работает под управлением программы, созданной в среде Arduino. Он анализирует символьные последовательности, поступающие по последовательному интерфейсу, и при обнаружении команды, адресованной блоку коммутаций, включает или выключает соответствующие реле. В таблице 1 для справки приведён список команд последовательного интерфейса установки, используемых в процессе измерения ВАХ. В первой части таблицы приведены команды, распознаваемые штатным блоком управления APS-7612, во второй части – команды, обрабатываемые микроконтроллером блока коммутаций.

Таким образом, разработанная и созданная установка может быть использована на практике в научных исследованиях совместно с автоматизированным комплексом для определения фотоэлектрических характеристик солнечных элементов [1] для получения темновых ВАХ, а также в составе лабораторного стенда при обучении студентов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 17-12-01176).

Таблица 1. Список команд модернизированного источника питания APS-7612, используемых в процессе измерений ВАХ.

Команда	Описание
Команды, обрабатываемы контроллером APS-7612	
VSET1:12.34	Set the maximum output voltage.
VOUT1?	Request the actual voltage output.
ISET1:1.234	Set the maximum output current.
IOUT1?	Request the actual output current.
OUT1	Enable the power output.
OUT0	Disable the power output.
Команды, обрабатываемы контроллером Iskra Mini	
VACP0	Установить нормальную полярность на выходе
VACP1	Установить обратную полярность на выходе
VACR1	Установить диапазон измерения тока – 200.0 мА
VACR2	Установить диапазон измерения тока – 20.00 мА
VACR3	Установить диапазон измерения тока – 2.000 мА

Литература

1. Нуждин В.И., Коновалов Д.А., Валеев В.Ф., Степанов А.Л.: Разработка и изготовление автоматизированного комплекса для определения фотоэлектрических характеристик солнечных элементов. Казанский физико-технический институт им. Е. К. Завойского 2017. Ежегодник. Казань: КФТИ КазНЦ РАН 2018. с. 105–107.

Опытный образец скважинного прибора для измерения диэлектрических характеристик пластового флюида

Д. А. Коновалов, Я. В. Фаттахов, А. Р. Фахрутдинов, В. А. Шагалов, Р. Ш. Хабипов, А. Н. Аникин

Группа информационной безопасности, телекоммуникационных и сетевых технологий; лаборатория методов медицинской физики

Знания о свойствах углеводородов, залегающих в пластах, определяют методы воздействия на пласт при разработке месторождения, а также энергетические возможности залежей и перспективы их разработки. Поэтому точное описание пластовых флюидов имеет существенное значение при подготовке любого проекта добычи углеводородов. Эти знания важны практически на всех этапах проектирования: подсчёт запасов, проектирование скважин, интерпретация данных геофизических исследований, контроль за разработкой, транспортировка продукции, охрана окружающей среды и т.д. Исходя из вышесказанного, становится понятным актуальность создания аппаратуры, дающей достоверные сведения о свойствах пластовых флюидов в скважине.

Разработанный в лаборатории методов медицинской физики опытный образец скважинного прибора предназначен для измерения диэлектрических характеристик пластового флюида. Прибор может работать в составе скважинной лаборатории для определения фильтрационно-ёмкостных свойств пласта и свойств пластового флюида (СЛПФ). Процесс измерения заключается в измерении амплитудных и фазовых характеристик высокочастотных (ВЧ) колебаний, проходящих через измерительную конденсаторную ячейку заполненную, исследуемым флюидом. Блок-схема прибора представлена на рис. 1.

Прибор состоит из измерительной ячейки, детектирующего модуля, управляющего микроконтроллерного модуля и блока питания.

Измерительная ячейка представляет собой конденсатор, состоящий из корпуса 1 (наружный электрод) и коаксиально расположенного внутреннего электрода 4, зафиксированного от радиальных перемещений с помощью диэлектрической вставки 5 с отверстиями для протекания скважинного флюида. С двух сторон к корпусу 1 с помощью резьбы и уплотнений присоединены фланцы 2 и 3, которыми ячейка крепится к шасси с электроникой. Во фланцах также имеются отверстия для скважинного флюида. Электрод 4 через отверстие во фланце 2 с помощью металлической шпильки 6, размещённой в проходном изоляторе, подключён к детекторному модулю, размещённому на шасси с электроникой. Чертёж измерительной ячейки представлен на рис. 2.

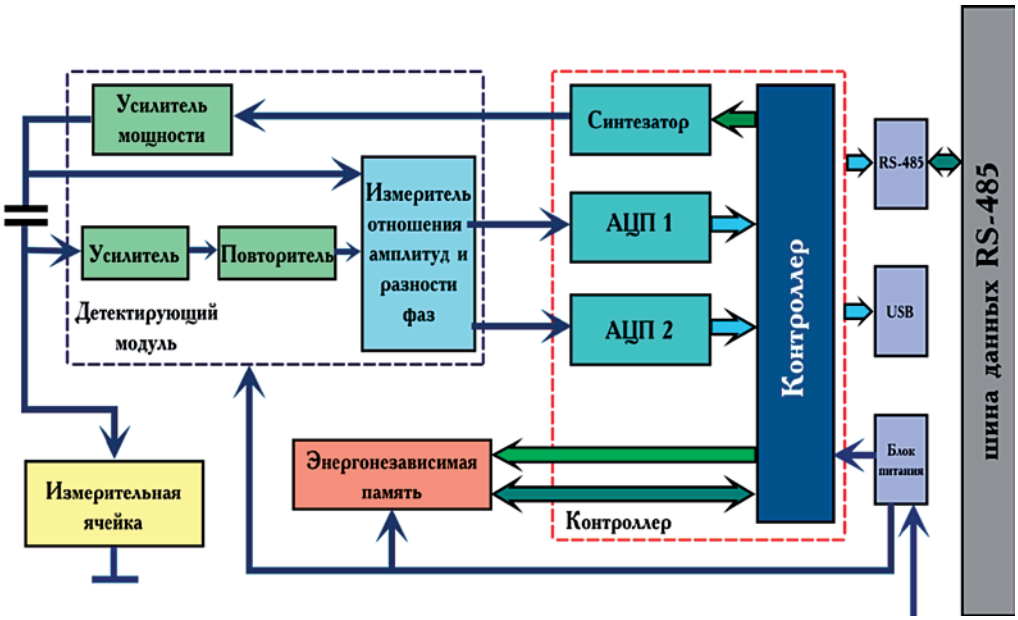


Рис. 1. Блок-схема скважинного прибора для измерения диэлектрических характеристик пластового флюида.

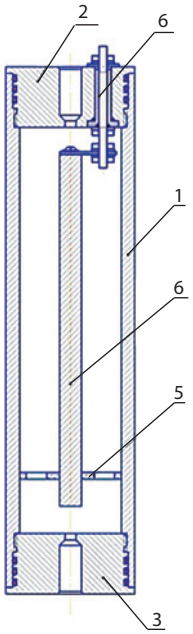


Рис. 2. Чертёж измерительной ячейки.

По разработанным чертежам была изготовлена и испытана измерительная ячейка скважинного прибора. Ячейка представляет собой цилиндрический конденсатор с рабочей полостью ∅70 мм, центральный электрод ∅6 мм зафиксирован в изоляционной втулке.

Микроконтроллерный измерительный модуль предназначен для формирования ВЧ-сигнала, измерения амплитудных и фазовых характеристик ВЧ-колебаний, проходящих через измерительную ячейку, заполненную исследуемым флюидом, предварительной обработки результатов измерений и передачи их в СЛПФ. На рис. 3 представлены варианты макета микроконтроллерного измерительного модуля.

Основные технические характеристики прибора:

– Диапазон рабочих частот: 1–100 МГц;
– Напряжение питания: не более 5 вольт;
– Потребляемый ток: не более 1 ампера;
– Длина прибора: не более 2.0 м;
– Вес прибора: не более 100 кг.

Прибор предназначен для работы в нефтяных скважинах на глубинах до 5 км, и должен работать в условиях повышенных давлений и температур.

Основные эксплуатационные характеристики прибора:

– Диаметр исследуемых скважин: от 170 мм до 300 мм;
– Температура в скважине: от +10 до +120 °С;
– Гидростатическое давление жидкости в скважине: до 100 МПа;
– Угол отклонения скважины от вертикали: не более 30 градусов.

Для тестирования прибора разработано специализированное программное обеспечение (ПО), эмулирующее работу приёмного модуля СЛПФ.

а

б

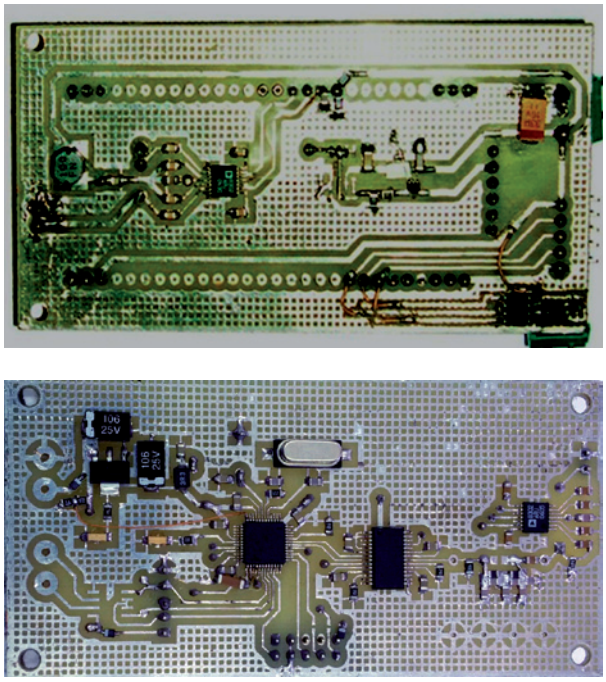


Рис. 3. Варианты макета микроконтроллерного измерительного модуля. **а** Макет измерительного модуля на базе отладочной платы STM32VL-DISCOVERY, **б** прототип микроконтроллерного измерительного модуля.

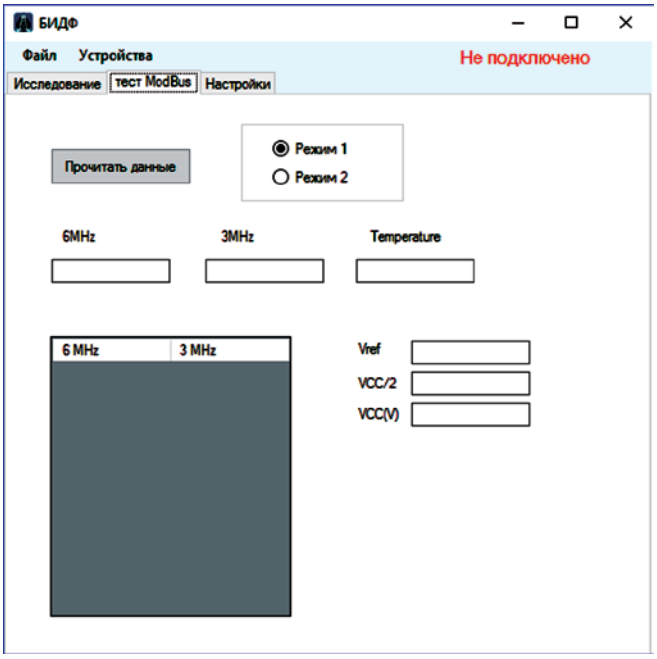


Рис. 4. Главное окно программы сканирования.

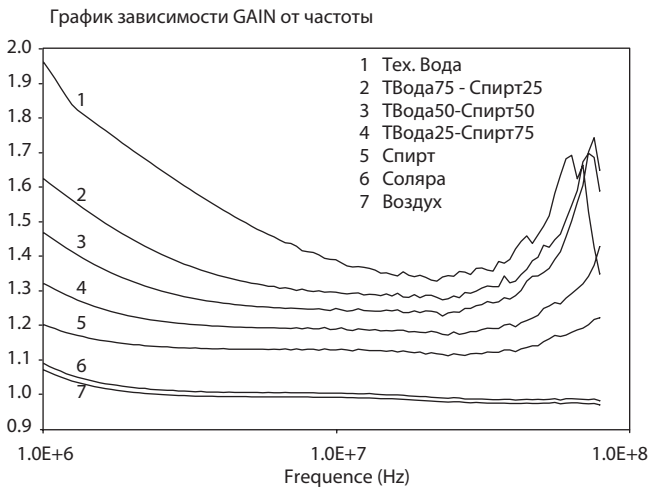


Рис. 5. Частотная зависимость диэлектрических свойств тестовых жидкостей.

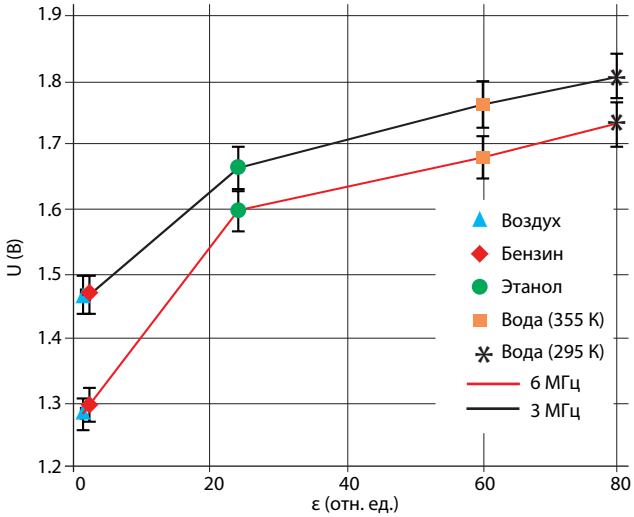


Рис. 6. Диэлектрическая проницаемость тестовых жидкостей для двух частот.

ПО обеспечивает:

– управление процессом сканирования путём формирования управляющих сигналов по заданной программе исследования;
– приём и анализ служебной информации о функционировании блоков;
– первичную обработку информации, формированием выходного потока;
– отображение получаемых данных.

Главное окно программы сканирования представлено на рис. 4.

На предварительном этапе разработки, для выбора оптимальных рабочих частот прибора, было исследовано поведение различных тестовых жидкостей в диапазоне частот от 1 до 80 МГц. Как видно из рис. 5 для частот выше 10 МГц разрешающая способность прибора уменьшается, а для частот выше 60 МГц интерпретация данных становится неоднозначной. Исходя из выше сказанного, область рабочих частот прибора была выбрана в диапазоне до 10 МГц.

На рис. 6 представлены результаты проведённых предварительных испытаний опытного образца скважинного прибора для измерения диэлектрических характеристик пластового флюида на двух фиксированных частотах для нескольких тестовых веществ с различными значениями диэлектрической проницаемости.

По приведённым данным можно утверждать, что тестовые вещества с различными значениями диэлектрической проницаемости уверенно дифференцируются с помощью опытного образца скважинного прибора.

Разработка опытного образца прибора велась в кооперации с ООО “ТНГ-Групп” и КФУ в рамках реализации проекта “Создание комплекса технических средств и программных продуктов для эффективной разработки залежей нефти в сложнопостроенных карбонатных коллекторах с использованием горизонтальных скважин и гидроразрыва пласта”.

Стационарное устройство для подачи жидкого азота в систему охлаждения вакуумной камеры ионного ускорителя ИЛУ-3

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

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

Разработано стационарное устройство, обеспечивающее непрерывную подачу жидкого азота в вакуумные ловушки ионного ускорителя ИЛУ-3 поочерёдно из двух сосудов Дьюара в автоматическом режиме. Устройство позволяет осуществлять ускоренный выход на рабочий режим, плавно регулировать поток жидкого азота в процессе работы, проводить облучение в круглосуточном режиме путём своевременной заправки пустых сосудов Дьюара. Система охлаждения дополнена трубопроводом отвода газообразного азота, что позволяет сохранять естественный газовый баланс в рабочем помещении. Разработанное устройство и его отдельные элементы могут найти применение в любых экспериментальных установках, в которых используется охлаждение потоком жидкого азота.

Существует класс экспериментальных установок, в которых нежелательно или невозможно по конструктивным соображениям использовать заливные системы охлаждения. В таком случае используются проточные системы охлаждения. Время работы таких систем ограничено ёмкостью используемых сосудов Дьюара. Для замены пустого сосуда Дьюара эксперимент приходится прерывать. Если жидким азотом охлаждаются вакуумные ловушки, то происходит их размораживание, что приводит к потере вакуума. При этом могут выйти из строя вакуумные измерительные лампы или другие составные части установки, работающие только при высоком вакууме.

В представленной статье описана система подачи жидкого азота, не требующая остановки эксперимента для заправки опустевшего сосуда Дьюара. Кроме того, в описанной системе:

- предусмотрен форсированный выход на рабочий режим;
- предусмотрена плавная регулировка потока жидкого азота;
- обеспечена надёжная герметизация горловины сосуда Дьюара при давлении до 1.5 кгс/см^2;
- для предотвращения образования конденсата сведено к минимуму попадание атмосферного воздуха в систему азотного охлаждения;
- предусмотрена система отвода газообразного азота из рабочего помещения, так как большой объём выделяющегося азота может существенно изменить естественный газовый баланс в помещений.

В настоящее время известны устройства для подачи хладагента [1], создание давления в которых осуществляется с помощью электрического нагревателя, расположенного внутри сосуда Дьюара ёмкостью 15 л. Это техническое решение используется в описываемом устройстве.

Стационарное устройство для непрерывной подачи жидкого азота содержит два сосуда Дьюара СК-40, которые являются частью его конструкции. При эксплуатации не предусмотрено их отсоединение или перемещение. Заправка стационарных сосудов Дьюара устройства производится переливом из транспортируемых сосудов Дьюара СК-40 с помощью специально разработанного для этих целей подъёмно-поворотного электромеханизма.

На рис. 1 показано стационарное устройство для подачи жидкого азота (стационарный сосуд Дьюара справа показан в разрезе).

Каждый сосуда Дьюара 1 снабжён фланцем 3 и герметизирующей кольцеобразной прокладкой 16. Фланцы 3 выполнены с двумя патрубками 4 и 8. Патрубок 4 является заправочным и герметично соединён с предохранительным клапаном 6, выполненным съёмным. Патрубок 8 герметично соединён с заглушкой 7, которая также выполнена съёмной. Средняя часть патрубка 8 выполнена с внутренней резьбой и посадочным местом для питателя 20, выполненного съёмным. В патрубке 8, выполнен отвод 9 под камеру 10 шарикового клапана 15. Верхняя часть камеры 10 герметично соединена с нижней резьбовой частью штуцера 11, нижний торец которого выполнен со шлицевыми прорезями. Фланец 3 винтовым соединением прикреплён к ручкам 2 сосуда Дьюара 1 и снабжён герметичными токовводами (не показано). Токовводы соединены проводами 19 с нагревателем 22, и датчиком 21 уровня жидкого азота. Датчик 21 размещённым на расстоянии 30–50 мм выше нагревателя 22.

Нижняя тонкостенная часть патрубка 8 выполняет функцию тепловой развязки.

Стационарные сосуды Дьюара 1 прикреплены к полу (не показано).

В качестве электрического нагревателя 22 могут быть использованы галогенные лампы JC (цоколь G4), 12 В мощностью 20–50 Вт или 24 В мощностью 150 Вт. Они обладают малой тепловой инерционностью. Необходимая мощность нагревателя, может подбираться так же параллельным или последовательным соединением нескольких ламп.

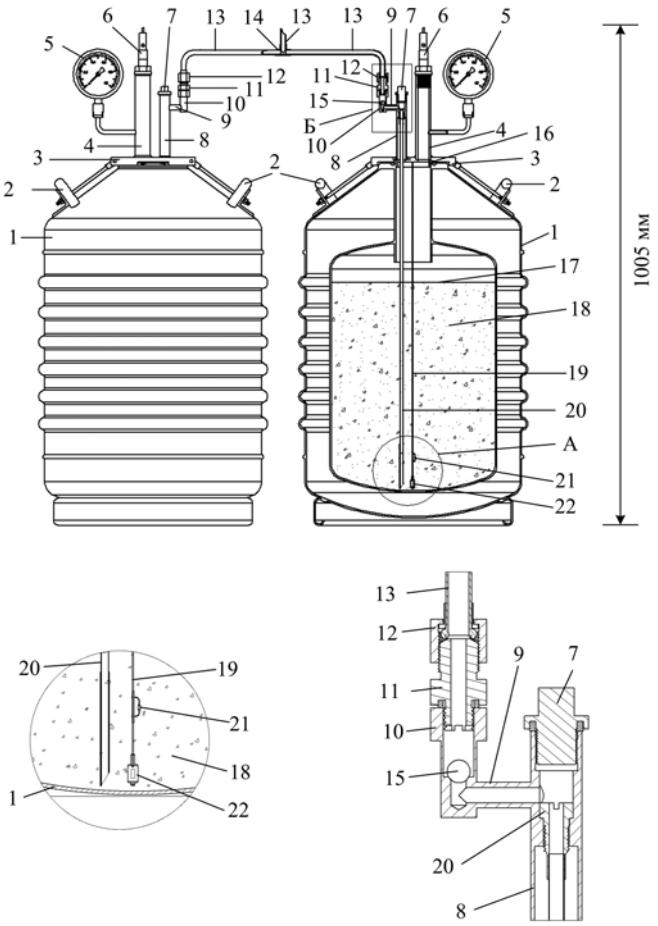


Рис. 1. Стационарное устройство для подачи жидкого азота. 1 – сосуд Дьюара; 2 – ручка сосуда Дьюара; 3 – фланец; 4 – заправочный патрубок; 5 – манометр; 6 – предохранительный клапан; 7 – заглушка; 8 – теплоразвязывающий патрубок; 9 – отвод; 10 – камера шарикового клапана; 11 – штуцер; 12 – накидная гайка; 13 – трубопровод; 14 – тройник; 15 – шариковый клапан; 16 – кольцеобразная прокладка; 17 – поверхность жидкого азота; 18 – жидкий азот; 19 – соединительные провода; 20 – питатель; 21 – датчик; 22 – электрический нагреватель.

Работает стационарное устройство для подачи жидкого азота следующим образом.

При пропускании электрического тока через нагреватель 22 происходит испарение жидкого азота 18 и в сосуде Дьюара 1 создаётся давление на поверхность жидкого азота 17. Минимального давления (определяется весом шарика 15) достаточно чтобы открыть шариковый клапан 15. Жидкий азот 18 поднимается по питателю 20, через отвод 9 попадает в камеру 10 шарикового клапана 15, обтекает его, проходит через шлицевые прорези, выполненные на торце нижней резьбовой части штуцера 11, проходное отверстие в нем и попадает в трубопровод 13 азотных ловушек. При использовании регулируемого источника электрического питания нагревателя 22, обладающего повышенной мощностью (≥20 Вт), можно сократить время выхода устройства на рабочий режим, подав на нагреватель 22, максимальную мощность. В процессе работы мощность регулируют в зависимости от показаний манометра 5. По достижению критического давления (1.5 кгс/см^2), определяемого жесткостью пружины предохранительного клапана 6, он срабатывает автоматически.

Наличие двух сосудов Дьюара СК-40 в предлагаемом устройстве при расходе жидкого азота ~10 л/час позволяет довести рабочее время до восьми часов. Заправка сосуда Дьюара 1 производится через заправочный патрубок 4, после отсоединения предохранительного клапана 6. Во время заправки пустого сосуда Дьюара 1 его шариковый клапан 15 закрыт и препятствует прохождению в него жидкого азота 18 из работающего сосуда Дьюара 1. Своевременная заправка пустого сосуда Дьюара 1 во время работы позволяет работать круглосуточно.

После окончания работы питание нагревателя 22 отключается, давление в сосуде Дьюара 1 сбрасывается частичным выкручиванием предохранительного клапана 6. В резьбовой части предохранительного клапана 6 ниже фторопластовой прокладки предусмотрено отверстие диаметром 3 мм (не показано). После этого выкручивается и снимается заглушка 7 и вынимается питатель 20. При необходимости, производится заправка сосуда Дьюара 1, затем заглушка 7 и предохранительный клапан 6 возвращаются на свои места и закручиваются. Естественного испарения азота 18 достаточно для образования давления поднимающего шарик 15. Газообразный азот, проходящий по трубопроводу 13 и азотным ловушкам, вытесняет из них атмосферный воздух и препятствует образованию конденсата в системе азотного охлаждения.

На рис. 2 показана принципиальная схема блока управления стационарного устройства подачи жидкого азота. Оба канала управления одинаковы и функционально равнозначны.

Блок управления стационарного устройства подачи жидкого азота работает следующим образом.

Допустим, что устройство не заправлено жидким азотом (оба сосуда Дьюара 8 пустые) и блок управления стационарного устройства подачи жидкого азота подключен к источникам электрического питания.

По цепи последовательно соединённых красного светодиода HL2 и замкнутой контактной группы реле K1 течёт ток, вызывающий свечение светодиода. Ток также течёт и по цепи последовательно соединённых резистора R12, светодиода оптронного реле U, подстроечного резистора R13, датчика наличия азота 9 в качестве которого используется диод Д2 – КД520А. Падения напряжения на выводах датчика наличия азота Д2 не достаточно для открытия управляемого ключевого элемента М. Регулировка порога срабатывания производится подстроечным резистором R13.

После заправки сосудов Дьюара жидким азотом падение напряжения на выводах датчика наличия азота Д2 увеличивается, что приводит к открыванию управляемого ключевого элемента М и срабатыванию реле K1. При этом срабатывает реле K2, а красный светодиод HL2 гаснет. Группы контактов K2.1 и K2.2 замыкаются, приводя в состояние готовности регулятор мощности 2 и узел удержания 6, соответственно.

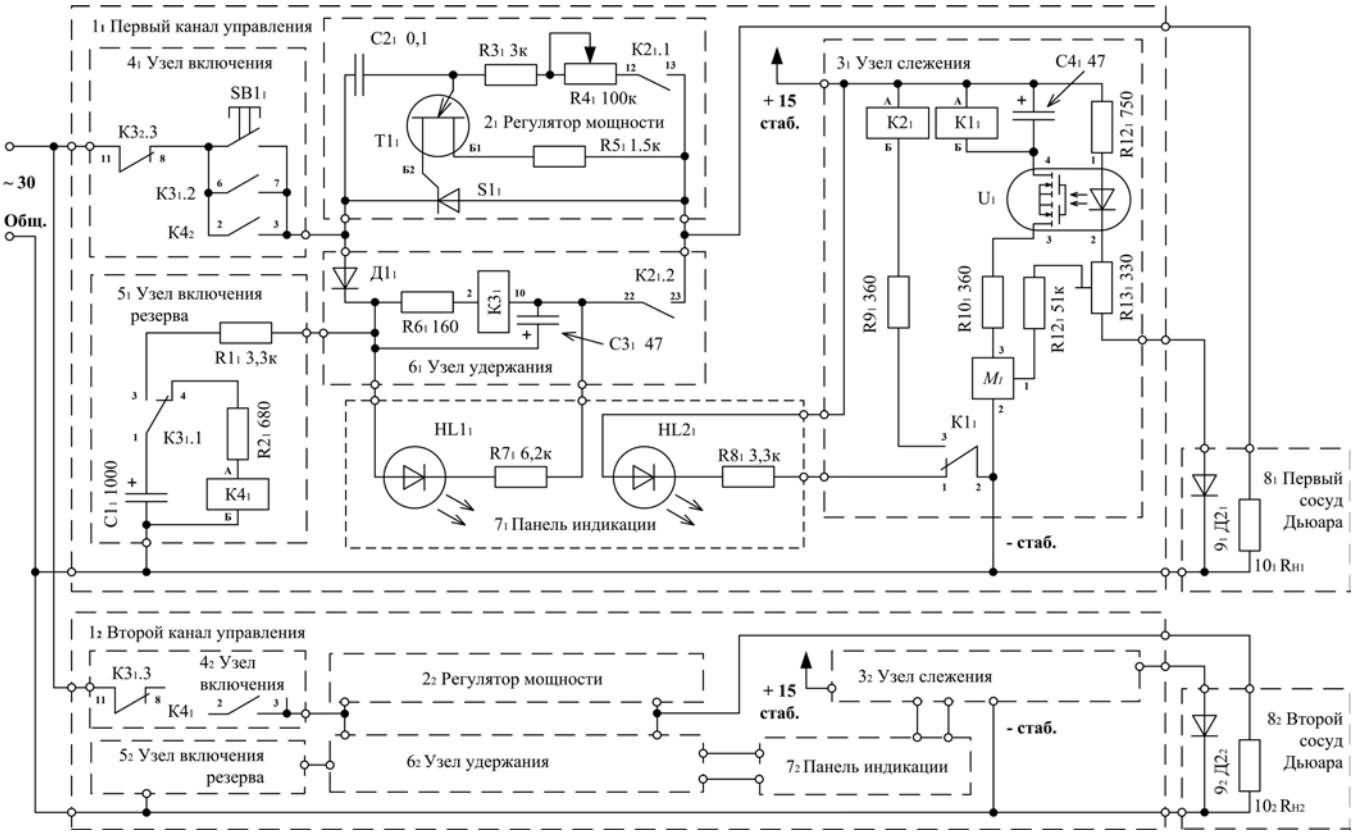


Рис. 2. Принципиальная схема блока управления стационарного устройства. Т1 – КТ117Б; S1 – КУ202Н; Д1 – 1N4007; Д2 – Д520А; HL1 – 5313UVC; HL2 – 5313URC; М – TL431; U – CPC1017N; К1 – РЭС49; К2 – РЭС60; К3 – R15 3PDT 10A; К4 – РЭС47.

При кратковременном замыкании контактов кнопки включения, например, первого канала управления 1_1, $SB1_1$ через диод $Д1_1$, узел удержания 6_1 и нагреватель $Rн_1$ начинает протекать пульсирующий сигнальный ток положительной полярности. Загорается белый светодиод $HL1_1$, сигнализируя о включении первого канала управления. Реле $К3_1$ срабатывает. При этом контактная группа $К3_1.2$ замыкается и блокирует кнопку SB1, контактная группа $К3_1.3$ (находится в узле включения 4_2 второго канала) размыкается и блокирует включение второго канала управления, контактная группа $К3_1.1$ переключается и через резистор $R1_1$ начинает заряжаться конденсатор $С1_1$ (время зарядки 8–10 сек).

Во время работы, перемещением ползунка переменного резистора $R4_1$ фазосдвигающей цепи однополупериодного фазового регулятора мощности 2_1, по отрицательной полуволне питания ~30 В регулируется тепловая мощность, выделяемая нагревателем $Rн_1$. По мере расхода жидкого азота в сосуде Дьюара 8_1, наступает момент, когда датчик $Д2_1$ оказывается в газообразной среде. Ток, проходящий через него, начинает его нагревать. Разность потенциалов на его выводах уменьшается, ключевой элемент $М_1$, а затем реле $К1_1$ отключаются. Зажигается красный светодиод $HL2_1$, сигнализируя, что азот в сосуде Дьюара 8_1 закончился. Размыкаются контакты первой $К2_11$ и второй $К2_12$ групп реле $К2_1$, отключая соответственно фазовый регулятор мощности 2_1 и узел удержания 6_1. Белый светодиод $HL1_1$ гаснет, сигнализируя о прекращении работы первого канала управления 1_1. Отключение реле $К3_1$ приводит к переключению контактов группы $К3_11$, размыканию контактов группы $К3_12$ и замыканию контактов $К3_13$ в узле включения 4_2 второго канала управления 1_2. Напряжение накопительного конденсатора $С1_1$ прикладывается к обмотке реле $К4_1$. На время разряда накопительного полярного конденсатора $С1_1$ (1.5–2 сек) реле $К4_1$ включается и контакты $К4_1$ узла включения 4_2 второго канала управления 1_2 замыкаются. Включается второй канал управления 1_2 и описанный выше процесс повторяется.

При обрыве цепи нагревателя Rн во время работы, переход на резервный сосуд Дьюара 8 происходит автоматически. С такой неисправностью при нажатии кнопки включения SB1 соответствующий канал управления не включиться и белый светодиод HL1 загораться не будет.

При обрыве цепи датчика наличия жидкого азота Д2 оптронное реле U разрывает цепь включения реле К1. Поэтому свечение красного светодиода HL2 при полном сосуде Дьюара будет указывать на неисправность.

Заключение

Описанное устройство в количестве двух экземпляров успешно в течение нескольких лет эксплуатируются в

Казанском физико-техническом институте КазНЦ РАН в отделе радиационных воздействий на материалы на ионном ускорителе ИЛУ-3. Оператору ускорителя в процессе имплантации приходится контролировать одновременно около тридцати параметров установки, поэтому усовершенствование позволило наряду с удобным расположением органов управления свести до минимума время на обслуживание криогенной системы ускорителя. Безопасность работы с устройством обеспечивается пониженным напряжением электропитания, а также наличием предохранительного клапана сброса давления в сосуде Дьюара.

Опыт эксплуатации устройства показал, что бесперебойная (без потери вакуума) подача жидкого азота, во время переключения с пустого сосуда Дьюара на полный происходит при соблюдении следующих условий:

- Давление в работающем сосуде Дьюара на момент отключения должно быть не менее 0.5 кгс/см^2.
- Остатка жидкого азота в работающем сосуде Дьюара должно хватить на 30 мин работы по инерции после отключения нагревателя. Для сосуда Дьюара СК-40 это условие соблюдается при размещении датчика выше нагревателя на 30–50 мм.
- Мощность нагревателя в максимальном режиме должна обеспечить выход на рабочий режим (~1.5 кгс/см^2) во втором сосуде за 30 мин.

На стационарное устройство для непрерывной подачи жидкого азота и блок управления стационарного устройства получены два патента РФ на изобретение [2, 3].

Литература

1. Нуждин В.И., Валеев В.Ф., Коновалов Д.А.: ПТЭ вып. 6, 1–2 (2016) DOI: 10.7868/S0032816216060276
2. Нуждин В.И., Петухов В.Ю.: Патент РФ на изобретение № 2604045, Бюл. № 34 (2016)
3. Нуждин В.И., Валеев В.Ф., Коновалов Д.А.: Патент РФ на изобретение № 2588231, Бюл. № 18 (2016)

Разработка и изготовление автоматизированного комплекса для определения фотоэлектрических характеристик солнечных элементов

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

Лаборатория радиационной физики, группа информационной безопасности, телекоммуникационных и сетевых технологий, группа нанооптики и наноплазмоники

Разработан и изготовлен автоматизированный комплекс для определения фотоэлектрических характеристик полупроводниковых элементов. Данный комплекс позволяет измерять ток короткого замыкания, напряжение холостого хода, вольтамперную характеристику и оценить оптическую прозрачность солнечных электрических преобразователей в ручном и автоматическом режимах.

В настоящее время основу солнечной энергетики составляют модули солнечных электрических преобразователей (СЭП). Для характеризации СЭП международным сообществом разработан стандарт IEC 60904-9 [1], в котором даются определения параметрам фотоэлектрических модулей и средствам для их измерения. Для определения параметров СЭП выпускаются промышленные дорогостоящие комплексы, состоящие из имитатора солнечного света и измерительного блока с активной нагрузкой, например, такие, как на странице [2]. Подобные комплексы предназначены для характеризации крупногабаритных СЭП размерами до 150×150 мм. Их можно использовать как в производственных, так и в лабораторных условиях. Однако, для изучения опытных компактных образцов СЭП, размеры которых не превышают 10×10 мм применение таких дорогих и громоздких комплексов технически и экономически неоправданно. В настоящей работе приводится описание оригинального разработанного и изготовленного в КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН автоматизированного комплекса для измерения фотоэлектрических параметров опытных тонкоплёночных образцов СЭП малых размеров. С помощью созданного комплекса реализована возможность измерения в ручном и автоматическом режимах тока короткого замыкания, напряжения холостого хода, вольтамперной характеристики (ВАХ) и оптической прозрачности СЭП. Наличие ручного режима позволяет использовать комплекс для обучения студентов при выполнении учебных лабораторных работ.

На рис. 1 представлена функциональная схема разработанного комплекса. Под действием потока оптического излучения от стабильного источника света в результате фотовольтаического эффекта на контактах СЭП появляется разность потенциалов – фото-ЭДС, и через сопротивление нагрузки $R_н$ начинает протекать электрический ток. Значения фото-ЭДС и тока протекающего через нагрузку измеряются, соответственно, вольтметром V и амперметром А. Часть светового потока, прошедшая через образец СЭП попадает на фотодиод, служащий

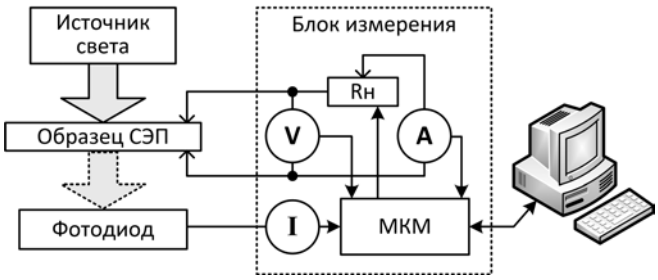


Рис. 1. Функциональная схема автоматизированного комплекса для определения фотоэлектрических характеристик солнечных элементов.

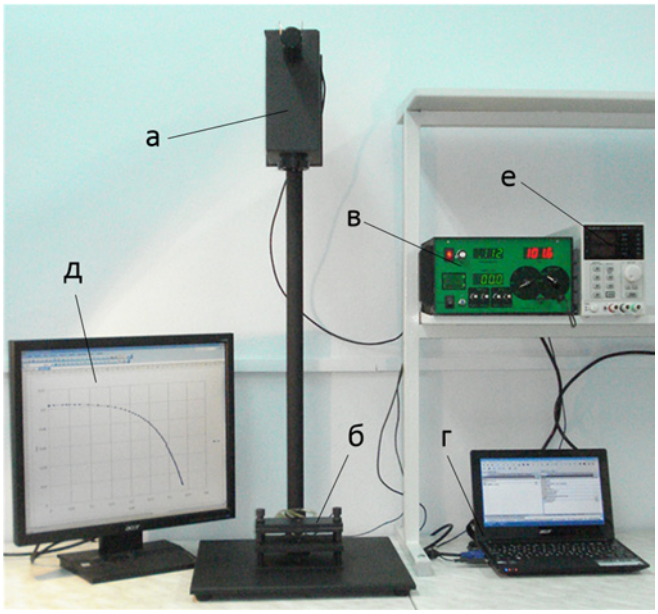


Рис. 2. Фотография автоматизированного комплекса для определения фотоэлектрических характеристик солнечных элементов: (а) – осветительно-проекционная система, (б) – оптический столик для крепления образцов, (в) – устройство измерения фотоэлектрических характеристик СЭП, (г) – компьютер, (д) – монитор, (е) – установка для измерения вольтамперных характеристик полупроводниковых элементов [3].

датчиком для измерения прозрачности образца. Величина пропускание образца измеряется прибором I.

Изменяя сопротивление нагрузки $R_н$ от бесконечности до нуля, можно определять такие характеристики СЭП, как напряжение холостого хода, ток короткого замыкания, максимальная электрическая мощность, а также вольтамперная и нагрузочная характеристики. Цифровые измерительные приборы V, A и I (рис. 1) содержат в своём составе нормирующие усилители-преобразователи. Электрические сигналы с выходов этих усилителей подаются на входы аналогово-цифрового преобразователя (АЦП) микроконтроллерного модуля (МКМ). МКМ осуществляет управление сопротивлением нагрузки $R_н$, измерением, а также запись значений напряжения и тока автономно или под управлением от компьютера.

На рис. 2 приведена фотография разработанного автоматизированного комплекса. Осветительно-проекционная система (а) расположена на вертикальной штанге над оптическим столиком для крепления образца (б). В качестве источника света используется галогеновая лампа OSRAM 64642 HLX 150 W-24 V G6.35, характеризуемая сплошным спектром излучения чёрного тела. Охлаждение лампы осуществляется принудительной вентиляцией. Диаметр светового пятна в плоскости анализируемого образца равен 10 мм.

Оптический столик, предназначенный для крепления образца в заданной точке освещения, показан на рис. 3. Он содержит основание 1, нижнюю 2 и верхнюю 3 контактные пластины, между которыми располагается образец 4. Основание и контактные пластины, содержат центрированные отверстия, предназначенные для прохождения света. Под отверстием в основании расположен фотодиод 5 (ФД 24 К) закреплённый прижимным кольцом 6, винтами 7 и закрыт экранирующей крышкой 8. Для термостабилизации фотодиода и анализируемого образца основание и контактные пластины содержат водяные протоки 9, в которые через штуцера 10 подаётся дистиллированная вода определённой температуры. Диэлектрические изоляторы 11 резьбовой частью прикреплены к нижней контактной пластине, а к основанию крепежными винтами 12. Верхняя контактная пластина является съёмной. Прижим

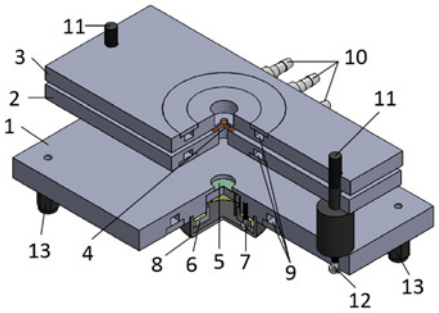


Рис. 3. Оптический столик для крепления образцов: 1 – основание, 2 – нижняя контактная пластина, 3 – верхняя контактная пластина, 4 – образец, 5 – фотодиод, 6 – прижимное кольцо, 7 – винт, 8 – экранирующая крышка, 9 – водяные протоки, 10 – штуцер, 11 – диэлектрический изолятор, 12 – крепежный винт, 13 – ножка.

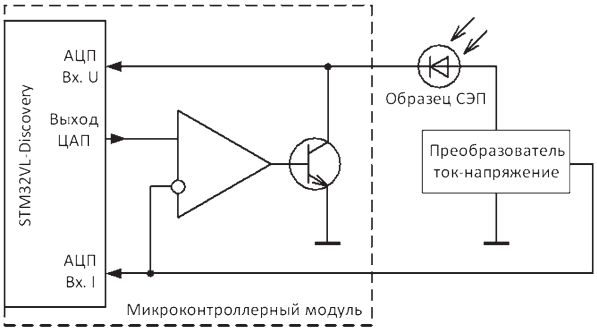


Рис. 4. Упрощённая схема получения ВАХ солнечного элемента.

верхней контактной пластины к образцу осуществляется барашками (не показано). Подсоединение проводников к контактным пластинам, а также к фотоэлементу 5 не показано. Основание снабжено ножками 13.

Устройство измерения фотоэлектрических характеристик СЭП выполнен в отдельном корпусе ((в) на рис. 2) и содержит блок стабилизированного питания источника света, МКМ, три цифровых измерительных прибора с усилителями-преобразователями, жидкокристаллический дисплей (ЖК), органы управления, коммутационные разъёмы, а также слот для карты памяти стандарта SD.

МКМ предназначен для измерения экспериментальных ВАХ СЭП в автоматическом режиме.

В состав МКМ входят:

1. микроконтроллерная отладочная плата STM32VL-Discovery;
2. управляемая нагрузка на базе источника тока управляемого напряжением;
3. графический ЖК индикатор;
4. слот для SD карты.

МКМ работает под управлением микроконтроллерной программы, написанной на языке С. На рис. 4 представлена упрощённая схема измерения ВАХ СЭП с помощью МКМ. Управляющая программа МКМ последовательно устанавливает на выходе ЦАП напряжение от 0 до неко-

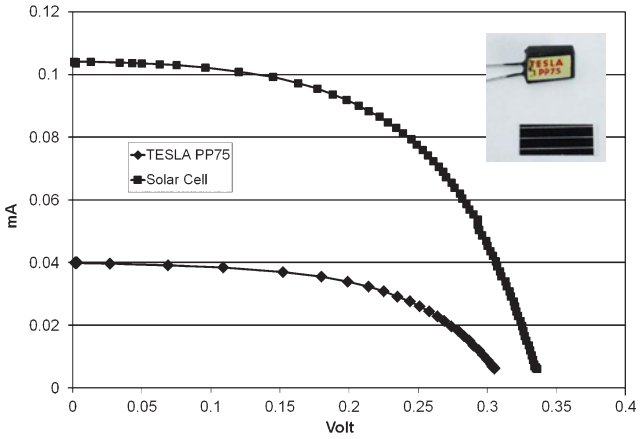


Рис. 5. Результаты измерений ВАХ тестовых фотопреобразователей

торого значения (определяется автоматически для каждого конкретного образца), соответствующего току короткого замыкания СЭП и производит опрос входных каналов АЦП. Данные полученные с АЦП пересчитываются в соответствующие физические величины, выводятся на экран ЖК индикатора в виде графика, а также в виде текстовой таблицы передаются в последовательный порт МКМ и записываются в файл на SD карту. Подключение к компьютеру осуществляется с помощью преобразователя USB-RS232. При этом также МКМ может функционировать автономно без подключения к компьютеру и без SD карты.

Созданный оригинальный комплекс имеет следующие технические характеристики:

- диапазон измеряемого напряжения (точность): 0–2 В (1 мВ);
- диапазоны измеряемого тока (точность): 0–20 мкА (0.01 мкА); 0–0.2 мА (0.1 мкА); 0–2 мА (1 мкА);
- точность измерения оптической прозрачности образца: 0.1%;
- диапазон стабилизации температуры оптического столика для крепления образца: от 15 до 35 °С;
- режимы измерения ВАХ: ручной; автоматический под управлением компьютера.

В качестве примера на рис. 5 показаны результаты измерений ВАХ тестовых фотопреобразователей – промышленных фотодиода (TESLA PP75) и солнечного элемента (Solar Cell), полученные с помощью разработанного комплекса.

Работа выполнена при финансировании РНФ № 17-12-01176.

Литература

1. IEC 60904-9: Photovoltaic devices – Part 9: Solar simulator performance requirements, ed. 2, Publication Date 2007-10-16.
2. http://sphotonics.ru/catalog/simulyatory-solnechnogo-sveta/solar-iv-series
3. Коновалов Д.А., Нуждин В.И., Валеев В.Ф. Степанов А.Л.: Создание установки для измерения вольтамперных характеристик полупроводниковых элементов. Казанский физико-технический институт им. Е. К. Завойского 2017. Ежегодник. Казань: КФТИ КазНЦ РАН 2018. с. 96–97.

Формирование пористого германия с наночастицами серебра методом ионной имплантации

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

Отдел когерентной и нелинейной оптики, группа нанооптики и наноплазмоники;
отдел радиационных воздействий на материалы, лаборатория радиационной физики

Предлагается методика синтеза слоёв пористого PGe с наночастицами Ag, основанная на низкоэнергетической высокодозовой имплантации ионами металла монокристаллического c-Ge. Имплантация ионами Ag^+ c-Ge проведена с энергией 30 кэВ при дозе $1.5 \cdot 10^{17}$ ион/см^2 и плотности тока в ионном пучке 5 мкА/см^2. Методами сканирующей электронной и атомно-силовой микроскопии, а также рентгеноспектрального микрозондового анализа и дифракции отражённых электронов показано, что в результате имплантации на поверхности c-Ge формируется пористый аморфный слой PGe губчатой структуры, состоящей из сетки пересекающихся нанонитей, средний диаметр которых составляет ~10–20 нм. На концах нитей прослеживается образование наночастиц Ag. Установлено, что формирование пор при проведении имплантации ионами Ag^+ сопровождается эффективным распылением поверхности Ge.

Введение

По-видимому, история исследования пористого германия (PGe) начинается с работы [1], в которой были изучены напылённые тонкие плёнки Ge с локальными пустотами (порами) в их структуре. В дальнейшем, для получения PGe использовались различные технологические подходы. Первые прямые доказательства формирования структуры PGe методом ионной имплантации на поверхности монокристаллического c-Ge были получены электронно-микроскопическими наблюдениями, при этом облучение подложки c-Ge осуществлялось ионам Ge^+ с энергией 50 кэВ [2]. В дальнейшем пористая структура была зарегистрирована, как показано в обзоре [3], для аморфных (a-Ge) и для c-Ge подложек при их низкоэнергетической и высокоэнергетической (>1 МэВ) имплантации различными ионами такими, как Ga^+, Ge^+, Mn^+, Ni^+, In^+, Sn^+, Sb^+, I^+, Au^+, и Bi^+. Отдельно отметим работы [4–7], в которых для создания слоёв PGe и их кристаллизации использовалась имплантация ионами Ag^+ при высоких энергиях 100 МэВ, но достаточно малых дозах в пределах $5.0 \cdot 10^{12}$–$2.0 \cdot 10^{14}$ ион/см^2. Настоящая работа также посвящена созданию слоёв PGe методом ионной имплантации, но при этом преследуется цель одновременно с формированием PGe структуры синтезировать в них наночастицы Ag (Ag:PGi). Для этого в настоящей работе впервые предлагается использовать низкоэнергетическую (<100 кэВ) высокодозовую (>$1.0 \cdot 10^{17}$ ион/см^2) имплантацию c-Ge ионами Ag^+, аналогично тому как подобные условия облучения успешно обеспечивали синтез слоёв пористого Si с наночастицами Ag [8–11]. Интерес к пористым полупроводниковым структурам с наночастицами благородных металлов, проявляющим плазмонные резонансные свойства, обусловлен перспективами их использования в различных приложениях: для повышения поглощательной способности в солнечных элементах [12], улучшения фотопроводимости [13], генерации электронно-дырочных пар [14] и т.д.

Эксперимент

Формирование PGe слоя с металлическими наночастицами осуществлялось на полированной подложке c-Ge толщиной 0.5 мм марки ГЭС-40. Для этого проводилась имплантация ионами Ag^+ с энергией 30 кэВ при дозе облучения $1.5 \cdot 10^{17}$ ион/см^2 и плотности тока в ионном пучке 5 мкА/см^2 на ионном ускорителе ИЛУ-3. Морфология структурируемой поверхности имплантированного c-Ge исследовалась на сканирующих электронных микроскопах (СЭМ) SU 8000 (Hitachi) и Merlin (Carl Zeiss), оснащённом детектором дифракции отражённых электронов (ДОЭ) HKL NordLys (Oxford Instruments). Контроль за элементным составом в образце осуществлялся энергодисперсионным рентгеноспектральным микроанализом при помощи ЭДС-спектрометра Aztec X-Max (Oxford Instruments).

С целью определения появления ступеньки вследствие распыления или вспучивания поверхности на границе облучённой и необлучённой частями образца на участок подложки *c*-Ge во время облучения накладывалась сетчатая никелевая маска с квадратными ячейками размером 20 мкм. Измерение профиля ступеньки проводилось на атомно-силовом микроскопе (АСМ) FastScan (Bruker).

Результаты и обсуждение

Используя компьютерную программу SRIM-2013 (www.srim.org), заложенную в ней методику моделирования

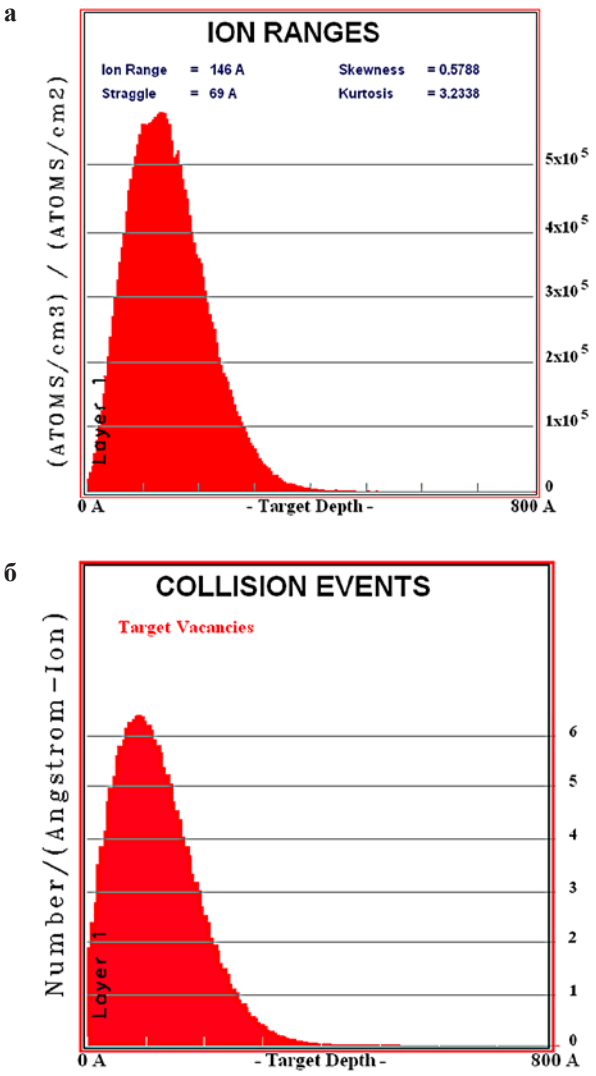


Рис. 1. Смоделированные профили распределения имплантированных ионов Ag^+ (**а**) и сгенерированных вакансий (**б**) в облучаемом с энергией 30 кэВ Ge.

профилей распределения имплантируемых ионов и генерируемых вакансий по глубине в облучаемых матрицах [17], в настоящей работе были рассчитаны соответствующие зависимости распределения ионов Ag^+ в Ge при энергии их ускорения 30 кэВ (рис. 1а, б). Из полученных зависимостей следует, что в начальный период облучения в приповерхностной области Ge происходит накопление атомов серебра с максимумом статистического распределения концентрации по гауссовой кривой на глубине $R_p \sim 14.6$ нм, а разброс пробега ионов от R_p составляет $\Delta R_p \sim 6.9$ нм (рис. 1а). При этом толщина имплантированного слоя оценивается как $R_p + 2\Delta R_p = 28.4$ нм. Однако, как это будет показано далее, продолжительное облучение, одновременно с образованием PGe и сегрегацией серебра у поверхности, приводит к эффективному распылению Ge. Профиль генерируемых вакансий в Ge при имплантации ионами Ag^+ имеет ту же форму и практически совпадает с распределением ионов Ag^+ по глубине образца (рис. 1б).

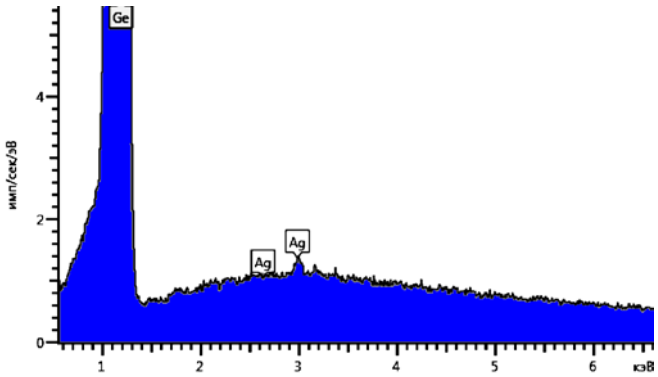


Рис. 2. Спектры энергодисперсионного рентгеноспектрального микроанализа Ge, имплантированного ионами Ag^+.

Энергодисперсионный рентгеноспектральный микроанализ имплантируемой поверхности Ge характеризуется спектром с пиками Ag в интервале энергий 2.5–3.5 кэВ (рис. 2), которые не наблюдались в спектре необлучённого Ge.

СЭМ-изображения поверхности Ge, имплантированного ионами Ag^+ в различных масштабах приведены на рис. 3. Как видно из приведённого рисунка, после проведения ионной имплантации полированная поверхность подложки c-Ge претерпевает существенное изменение, её морфология представляется высокоразвитой открытой пористой губчатой структурой PGe. Заметим, что подобная губчатая структура PGe, образуется при имплантации Ge, например, ионами Bi^+ с энергией 30 кэв [5], но существенно отличается от колончатого типа PGe, формируемого при имплантации более лёгким ионами Ge^+ [3, 16]. В целом, возможность создания пор имплантацией ионами Ge^+ указывает на то, что образование пор обусловлено не наличием примеси, а специфическими энергетическими условиями облучения [5]. Это можно принять и для нашего случая Ag:PGi, когда тяжёлая примесь может стимулировать появление губчатой структуры. Морфологическая однородность поверхности Ag:PGe наблюдаемая на достаточно большой площади образца в десятки микрон (рис. 3а), указывает на то, что пористая структура не является случайным локальным артефактом изменения поверхности при имплантации, и может характеризоваться понятием масштабируемость, важным для определённых технологических приложений. Увеличение масштаба фрагмента поверхности (рис. 3б и 3с) более отчётливо демонстрирует губчатую структуру пор, состоящую из переплетающихся нанонитей Ge (тёмно-серого цвета) со средними размерами их диаметра порядка 10–20 нм. При этом на концах наннонитей Ge наблюдаются близкие к сферическим ионно-синтезированные нанообразования (светлые пятна) размером порядка 20–30 нм. Для наглядности некоторые из этих нанообразований обведены на рис. 3б окружностями. Поскольку более тяжёлые химические элементы, регистрируемые детектором обратных рассеянных электронов, проявляются на

а

б

в

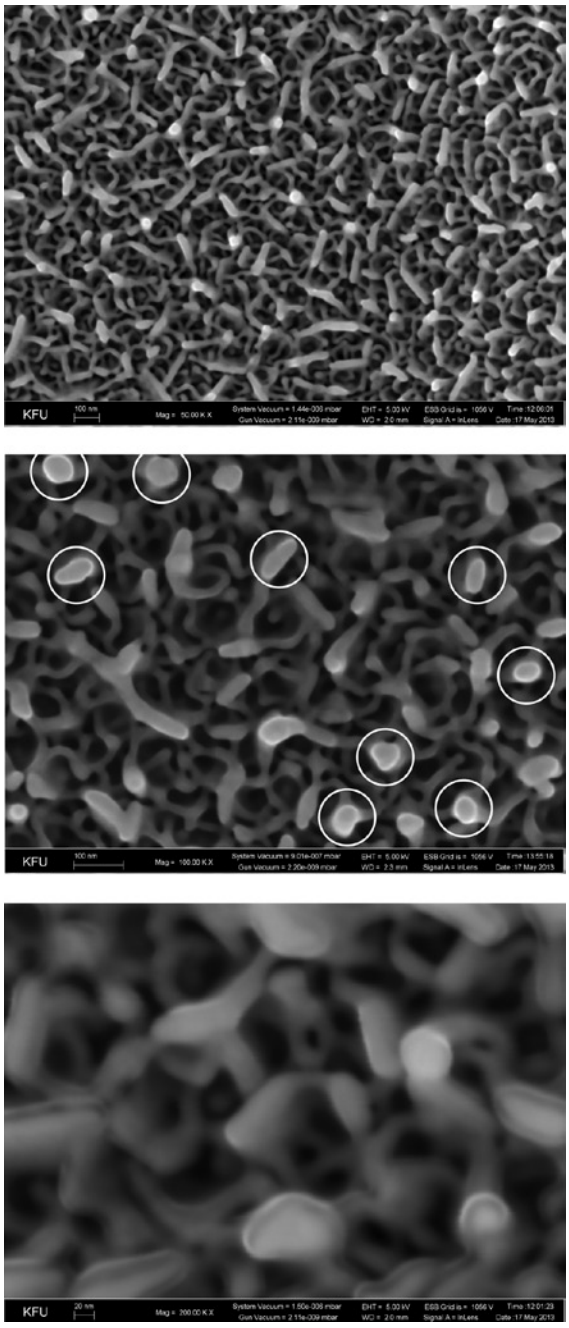


Рис. 3. СЭМ-изображения, приведённые в различных масштабах, поверхности PGe, сформированной при низкоэнергетической высокодозовой имплантации Ag^+-ионов в c-Ge.

СЭМ-микрофотографиях в более светлом тоне, то для композиционного материала, состоящего только из атомов Ge и имплантированного Ag, можно предполагать, что регистрируемые на несколько тёмном фоне (сигнал от Ge) светлые области – нанообразования определяются образовавшимся металлическим Ag в виде наночастиц. При этом следует отметить, что растворимость Ag в Ge исключительно мала (~10^{16} ат/см$^{-3}$), и для используемой дозы $1.5 \cdot 10^{17}$ ион/см^2, по аналогии с различными имплантированными полупроводниками и диэлектриками [11], зарождение металлического Ag в Ge вполне реалистично. Отметим также, что каких-либо химических соединений атомы Ag с Ge не образуют. Подобная ситуация наблюдалась ранее на СЭМ-изображениях для пористых слоёв PSi и PGeSi с наночастицами Ag, сформированных имплантацией ионами Ag^+ [8, 10, 18]. При максимальном увеличении (рис. 3в) видно, что толщина Ge нитей несколько уступает размерам наночастиц Ag.

а

б

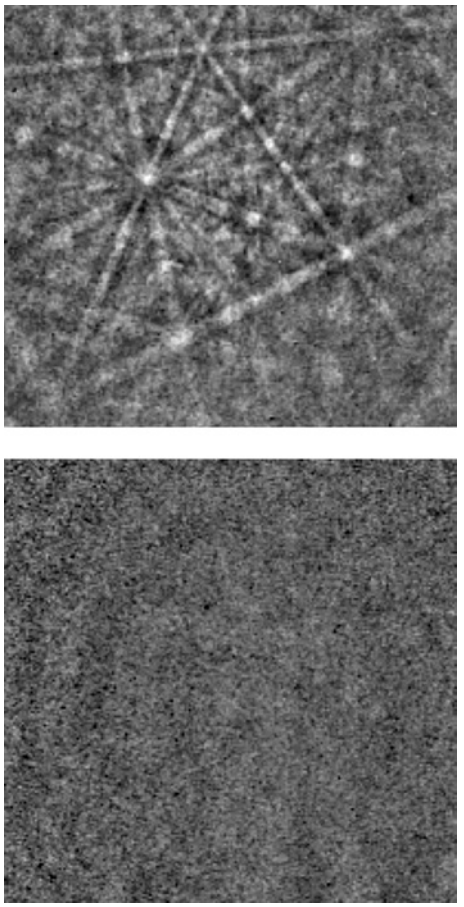
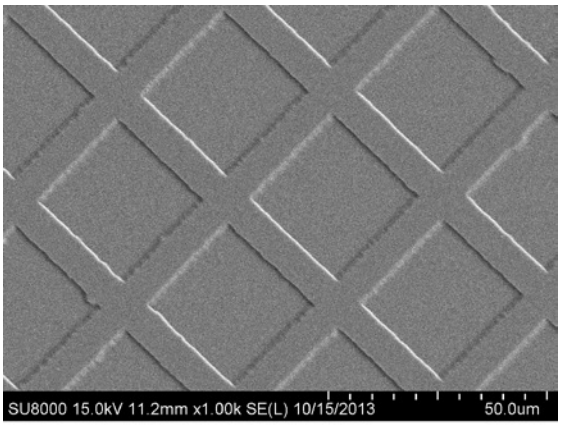


Рис. 4. Изображения ДОЭ-картин от поверхностей исходной подложки c-Ge (**а**), и той же подложки, имплантированной ионами Ag^+ (**б**).

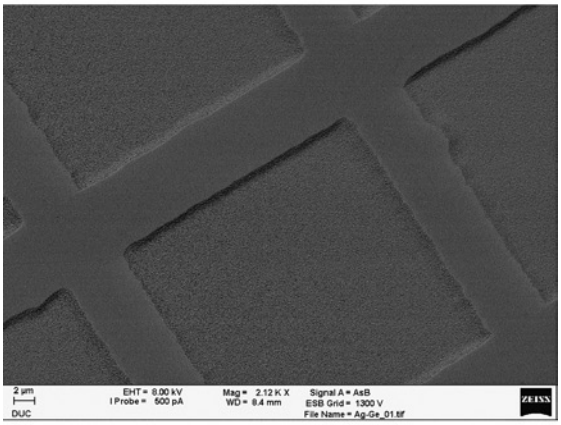
Структурная характеризация поверхности исходного и имплантированного образца проводилась при регистрации ДОЭ-картин (рис. 4). На рис. 4 показана экспериментально наблюдаемая картина дифракции Кикучи в отражённых электронах необлучённого c-Ge (рис. 4а), из которой следует, что используемые в работе подложки c-Ge характеризуется монокристаллической кубической структурой с параметрами $a = b = c = 5.66$ Å и $\alpha = \beta = \gamma = 90°$. Для поверхности имплантированного образца Ag:PGe в отличии от дифракции Кикучи в виде параллельных плоскостям кристаллической решётки полос, наблюдается ДОЭ-картина из широких диффузных колец (рис. 4б), отражающая разрушение решётки и формирование аморфного слоя PGe.

Как это принято в практике ионной имплантации, в частности, в случае Ge [5, 15, 16], для контроля процессов распыления или вспучивания поверхности облучаемого

а



б



в

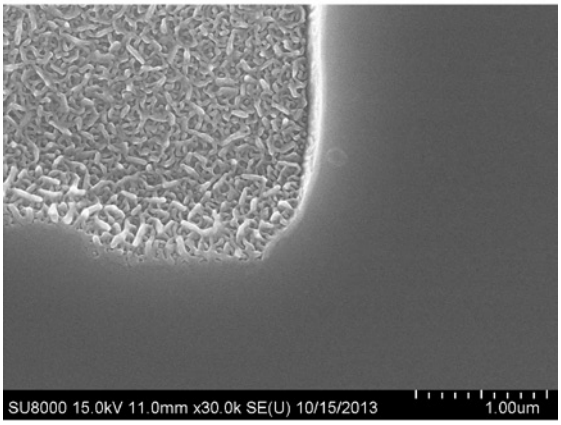


Рис. 5. СЭМ-изображения, приведённые в различных масштабах, периодических микроструктур на поверхности c-Ge с областями PGe, полученными при имплантации ионами Ag^+ через маску.

материала применяется имплантация через маску. СЭМ-изображение поверхности Ge, содержащего фрагменты микроструктур PGe, сформированных в настоящей работе имплантацией ионами Ag^+ через маску, приведено на рис. 5. С целью независимой оценки топологии поверхности после имплантации были проведены её наблюдения при разных масштабах и на двух различных СЭМ – SU 8000 (рис. 5а) и Merlin микроскопах (рис. 5б). Как видно из этих изображений, в результате имплантации на поверхности Ge формируются квадратные углублённые участки PGe, ограниченные стенками необлучённого c-Ge, что указывает на распыление поверхности Ge, а не на её распухание. По АСМ-данным была оценена глубина распыления участков, которая составляет около 100 нм. СЭМ-изображение, при большем увеличении на углу квадратной ячейки (рис. 5в) ясно демонстрирует образование губчатого PGe на имплантированной области ячейки. Из соотношений масс атомов Ge и Ag, а также относительно низкой энергии имплантации, можно говорить о доминировании ядерных столкновений ускоренных ионов Ag^+ с атомами подложки, и как следствие распыление последних по механизму прямого выбивания их из мишени [19]. Данный результат представляется важным с точки зрения определения путей образования PGe, и он оказывается несколько неожиданным, поскольку ранее было показано, что при формировании пор в Ge, имплантируемого ионами Ge^+, наблюдалось противоположное явление, распухание поверхности [16]. Поэтому предлагаемый, например, в работе [16], механизм образования пор в имплантируемом Ge, основанный на генерации и объединении вакансий в облучаемом полупроводнике, не может быть просто перенесен на случай имплантации c-Ge ионами Ag^+.

Отдельно следует упомянуть работу [20], в которой уверенно постулируется, что при имплантации подожки c-Ge ионами 1–7-й группы таблицы Д. И. Менделеева с массой $M_i > 72$ (Ag^+, Cd^+, In^+, As^+, Sb^+, Te^+ и I^+) при энергиях 30–180 кэВ с превышением критической дозы должны проявляться общие для всех ионов особенности имплантированных слоёв. Во-первых, появление разрыхлённой области, называемой ультрадисперсной средой, которая вспухает и образует ступеньку над необлучённой частью подложки, а во-вторых, говорится о том, что имплантированный слой представляет собой поликристаллическую структуру Ge с малыми размерами кристаллитов. При этом, как доказательство утверждения общности для всех ионов приводятся ограниченные экспериментальные результаты (методом травления и последующего взвешивания образцов, а также регистрацией электронограмм) лишь только для одного типа иона Sb^{2+} при фиксированных условиях имплантации: дозе $1.8 \cdot 10^{16}$ ион/см^2 и энергии 80 кэВ. Данных по другим типам ионов и вариациях облучения авторы работы [20] в научной литературе не предоставили. В то же время, как следует из представленных настоящей работы результатов, для случая имплантации c-Ge ионами Ag^+ наблюдается противоположная картина: зарегистрировано распыление поверхности Ge и формирование аморфного, а не поликристаллического слоя из PGe губчатой структуры.

Заключение

Таким образом, в настоящей работе впервые проведено наблюдение формирования PGe слоёв с наночастицами Ag на поверхности c-Ge при низкоэнергетической высокодозовой имплантации. Установлено, что имплантация приводит к ионному распылению поверхности, на кото-

рой образуется губчатая аморфная пористая структура. Ионная имплантация используется в промышленной полупроводниковой микроэлектронике для формирования различных типов Ge и GeSi нано- и микроустройств. Поэтому рассматриваемый метод получения PGe облучением ионами Ag^+, может быть достаточно легко интегрирован в индустриальный современный процесс совершенствования технологии изготовления микросхем. Полученные результаты позволяют ожидать от таких подложек эффекта гигантского усиления комбинационного рассеяния (SERS-активность).

Работа выполнена при финансировании грантом РНФ № 17-12-01176. А. М. Рогов благодарит за поддержку программу УМНИК. Ряд результатов по микроскопии был получен на оборудовании Междисциплинарного центра “Аналитическая микроскопия” Казанского (Приволжского) федерального университета.

Литература

1. Donovan T.M., Heinemann K.: Phys. Rev. Lett. **27**, 1974–1976 (1971)
2. Wilson I.H.: J. Appl. Phys. **53**, 1698–1705 (1982)
3. Böttger R., Heinig K.-H., Bischoff L., Liedke B., Facsko S.: Appl. Phys. A. **113**, 53–59 (2013)
4. Som T., Ghatak J., Sinha O.P., Sivakumar R., Kanjilal D.: J. Appl. Phy. **103**, 123532-1–123532-5 (2008)
5. Hooda S., Satpati B., Ojha S., Kumar T., Kanjilal D., Kabiraj D.: Mater. Res. Exp. **2**, 45903-1–45903-5 (2015)
6. Hooda S., Khan S.A., Satpati B., Uedono A., Sellaiyan S., Asokan K., Kanjilal D., Kabiraj D.: Microporous and Mesoporous Mater. **225**, 323–330 (2016)
7. Hooda S., Khan S.A., Satpati B., Strange D., Buca D., Bala M., Pannu C., Kanjilal D., Kabiraj D.: Appl. Phys. A **122**, 227-1–227-7 (2016)
8. Степанов А.Л., Осин Ю.Н., Трифонов А.А., Валеев В.Ф., Нуждин В.И.: Российские нанотехнологии **9**, 53–56 (2014)
9. Курбатова Н.В., Галяутдинов М.Ф., Нуждин В.И., Валеев В.Ф., Осин Ю.Н., Степанов А.Л.: Российские нанотехнологии **10**, 44–47 (2015)
10. Stepanov A.L., Nuzhdin V.I., Valeev V.F., Vorobev V.V., Kavetskyy T.S., Osin Y.N.: Rev. Adv. Mater. Sci. **40**, 155–164 (2015)
11. Степанов А.Л.: Фотонные среды с наночастицами, синтезированными ионной имплантацией. 353 с. Саарбрюккен: Lambert Acad. Publ. 2014.
12. Polman A.: Science **322**, 868–869 (2008)
13. Atwater H., Polman A.: Nature Mat. **9**, 205–213 (2010)
14. Cavalcoli A., Fraboni B., Impellizzeri G., Romano L., Scavetta E., Grimaldi M.G.: Microporous and Mesoporous Mater. **196**, 175–178 (2014)
15. Wesch W., Schnohr C.S., Kluth P., Hussain Z.S., Araujo L.L., Giulian R., Sprouster D.J., Byrne A.P., Ridgway M.C.: J. Phys. D: Appl. Phys. **42**, 115402 (2009)
16. Romano L., Impellizzeri G., Tomasello M.V., Giannazzo F., Spinella C., Grimaldi M.G.: J. Appl. Phys. **107**, 84314-5–84314-1 (2010)
17. Ziegler J.F., Biersack J.P., Littmark U.: The Stopping and Range of Ions in Solids. 412 p. New York: Pergamon Press 1985.
18. Баталов Р.И., Воробьев В.В., Нуждин В.И., Валеев В.Ф., Баязитов Р.М., Лядов Н.М., Осин Ю.Н., Степанов А.Л.: ЖТФ **86**, 104–110 (2016)
19. Никитенков Н. Процессы при взаимодействии ионов с поверхностью. 510 с. Саарбрюккен: Lambert Acad. Publ. 2011.
20. Закиров Г.Г., Хайбуллин И.Б., Зарипов М.М.: Поверхность **10**, 137–143 (1983)

Имплантация алмаза ионами серебра и создание дифракционного элемента

А. Л. Степанов, В. И. Нуждин, В. Ф. Валеев, М. Ф. Галяутдинов, Н. В. Курбатова, В. В. Воробьев, А. М. Рогов, Ю. Н. Осин

Группа нанооптики и наноплазмоники, лаборатория радиационной физики, лаборатория квантовой оптики и информатики, лаборатория быстропротекающих молекулярных процессов

В работе показан принципиально новый способ формирования дифракционной структуры на поверхности синтетического алмаза при его имплантации ионами серебра через наложенную маску. Впервые установлено, что в процессе ионного облучения в немаскированных областях имплантируемого алмаза в его приповерхностной области происходит формирование наночастиц серебра и ионное вытравливание поверхностного слоя. Данные структурные преобразования поверхности алмаза контролировались методами оптической, конфокальной, электронной и атомно-силовой микроскопии. Рамановская спектроскопия была использована для идентификации отсутствия образования графита при имплантации алмаза. Эффективность функционирования алмазного оптического дифракционного элемента продемонстрирована при его зондировании излучением полупроводникового лазера на длине волны 527 нм.

Введение

Решение задач современной интегральной оптики требует использования новых специальных материалов, а также разработки особых технологий изготовления рабочих компонентов и устройств на их основе [1]. Отдельное направление интегральной оптики опирается на использование оптических компонентов, созданных из алмаза, а связанное с этим направление называют алмазной интегральной оптикой [2]. Использование в качестве оптических материалов именно алмаза обусловлено его уникальной радиационной (лучевой) стойкостью и высокой теплопроводностью. Алмазные оптические элементы, обладая широким окном прозрачности от 0.2 до более 20 мкм, могут работать при резких перепадах температуры и в агрессивных химических средах. В настоящее время на практике алмазы используются для изготовления различных дифракционных оптических элементов (ДОЭ): решёток, киноформов, фокусаторов, корректоров и др. [2, 3]. Алмазные ДОЭ могут применяться для преобразования излучения высокомощного CO_2-лазера с плотностью мощности до 20 кВт/см^2 [4, 5], для создания фотонно-кристаллических резонаторов с целью реализации квантовых механизмов хранения и накопления информации [6], а также в рентгеновской оптике для управления потоками излучения, например, при использовании алмазных Брэгговских зеркал (отражающих дифракционных решёток) с коэффициентом отражения ~100% [7] и т.д.

Для получения периодических ДОЭ на алмазных подложках используются различные технологические способы, такие, как воздействие мощными импульсами эксимерного лазера [8], травление в потоке транспортного газа [9] и др. Относительно недавно, в 2016 г. авторами настоящей статьи был предложен новый подход для создания алмазного ДОЭ [10, 11], основанный на высокодозовой имплантации ионами бора монокристаллических пластин алмаза через поверхностные маски.

Задача настоящего исследования заключалась в развитии предложенной методики создания ДОЭ на алмазной подложке методом ионной имплантации ионами серебра через маски. Синтезированные в структуре ДОЭ наночастицы серебра позволят, используя их плазмонные свойства, управлять выбором оптических констант в структуре ДОЭ аналогично тому, как это было ранее реализовано на силикатных стёклах и полимерах [12–14]. Следует отметить, что попытки имплантировать алмаз ионами благородных металлов (золота и серебра) предпринимались и ранее [15, 16], однако создание ДОЭ в упомянутых экспериментах реализовано не было.

Эксперимент

Для формирования ДОЭ полированная поверхность искусственного оптически прозрачного бесцветного алмаза имплантировалась ионами серебра с энергией E = 30 кэВ, дозой облучения $D = 1.3 \cdot 10^{18}$ ион/см^2 при плотности тока в ионном пучке J = 2 мкА/см^2 на ускорителе ИЛУ-3 через поверхностную маску – никелевую сетку с размером квадратных ячеек 40 мкм. Локальная морфология и структура поверхности имплантированного алмаза были исследованы методами сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на СЭМ-микроскопе Merlin (Carl Zeiss), а также атомно-силовой микроскопии (АСМ) в полуконтактной моде с помощью АСМ-микроскопа FastScan (Bruker).

Оптическая характеризация ДОЭ проводилась на оптическом поляризационном микроскопе Полар-1 (Микромед) в режиме отражения и на конфокальном микроскопе LSM 780 (Carl Zeiss), а также при измерении спектров рамановского рассеяния. Анализ оптических

дифракционных картин от ДОЭ осуществлялся при его зондировании полупроводниковым лазером на длине волны 527 нм.

Моделирование концентрационных профилей распределения имплантированного серебра с энергией 30 кэВ в алмазе по глубине с помощью алгоритма SRIM-2013 показало, что атомы серебра накапливаются в приповерхностном слое алмаза толщиной ~25 нм, не проникая в его объём на большую глубину.

Результаты и обсуждение

На рис. 1 приведены изображения решётки, сформированной на поверхности алмаза имплантацией ионами серебра через поверхностную маску, наблюдаемые на оптическом (рис. 1а) и на СЭМ (рис. 1б) микроскопах. Как видно из приведённых изображений, периодическая микроструктура состоит из чередующихся тёмных квадратных ячеек, относящихся к имплантированным участкам поверхности образца, разделённых стенками (светлые области) неимплантированного алмаза. Размер имплантированных участков 40×40 мкм соответствует

а

б

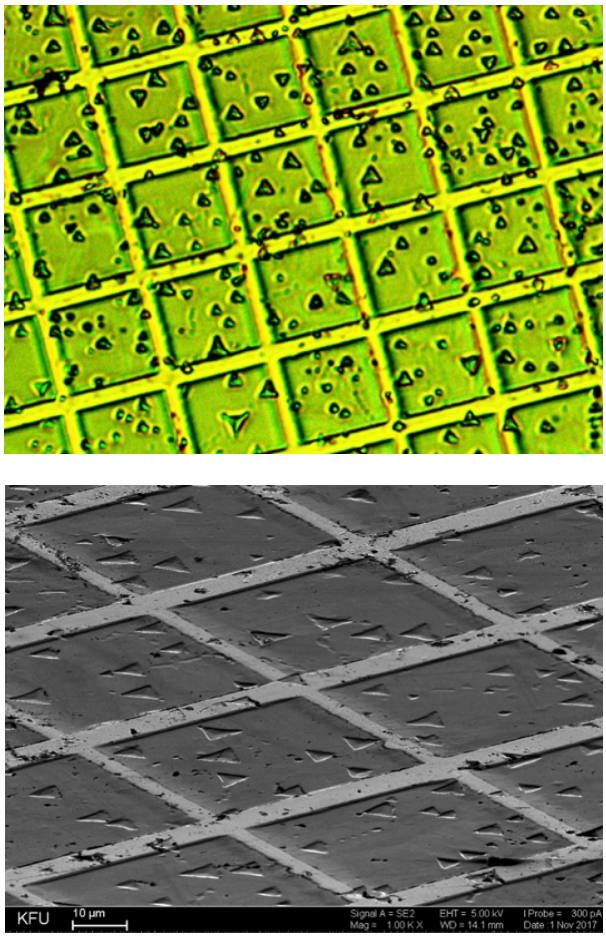


Рис. 1. Изображения алмаза, имплантированного через маску ионами серебра, наблюдаемые на оптическом (**а**) и электронном (**б**) микроскопах.

а

б

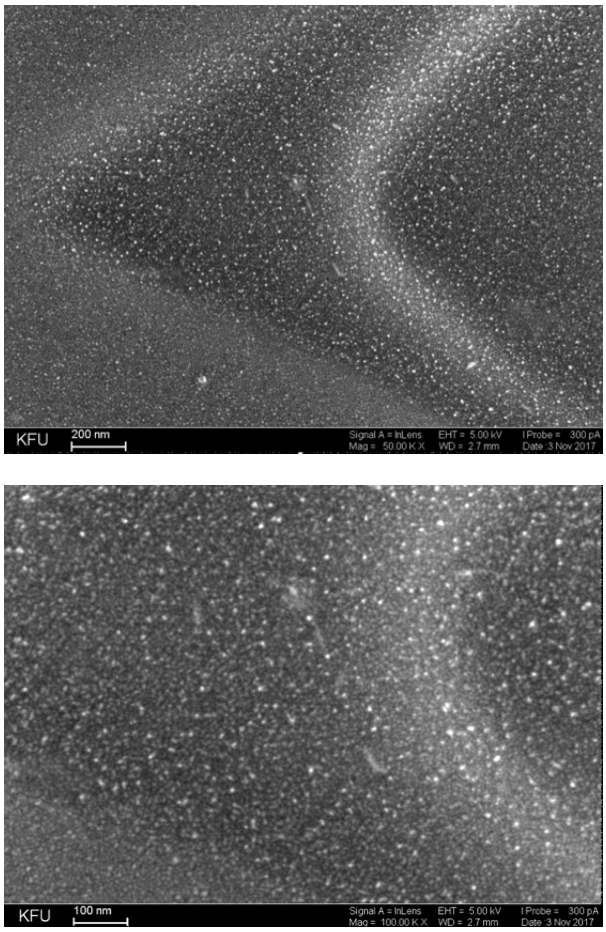


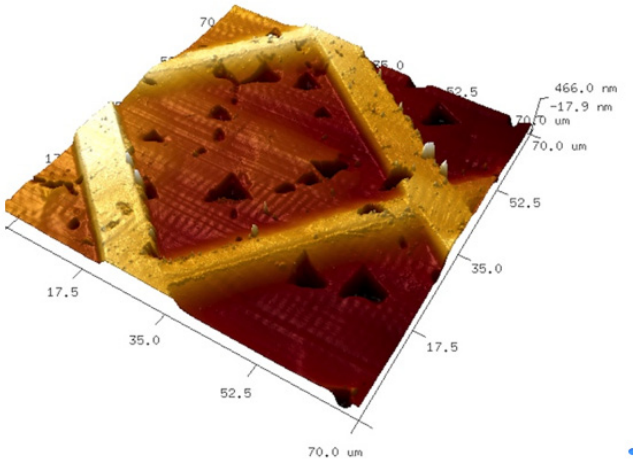
Рис. 2. СЭМ-изображения поверхности алмаза, имплантированного ионами серебра в области ячейки решётки.

размеру ячеек используемой маски. Из приведённых изображений также следует, что имплантированные ячейки в структуре алмаза находятся ниже уровня исходного материала, указывая на распыление алмаза ионами серебра. Наблюдаемые треугольные поверхностные микроструктуры присутствовали в алмазе до имплантации и являются дефектами – ямками травления, сформированными во время синтеза алмаза и скалыванием чешуек от объёмного образца.

СЭМ-изображения поверхности алмаза, имплантированного ионами серебра, в области отдельной ячейки решётки и в районе ямки травления, показаны в различных масштабах на рис. 2а, б. Из приведённых СЭМ-микрофотографий видно, как в структуре гладкой поверхность алмаза после имплантации формируются светлые сферические нанообразования по сравнению с тёмным алмазом, которые являются наночастицами серебра.

На рис. 3а приведено АСМ-изображение фрагмента имплантированной ячейки алмазного ДОЭ вблизи необлучённых участков (стенок), закрытых при облучении маской. Данное изображение также подтверждает, что в результате имплантации немаскированные области образца были подвергнуты ионному распылению, в результате чего были сформированы полые дифракционные

а



б

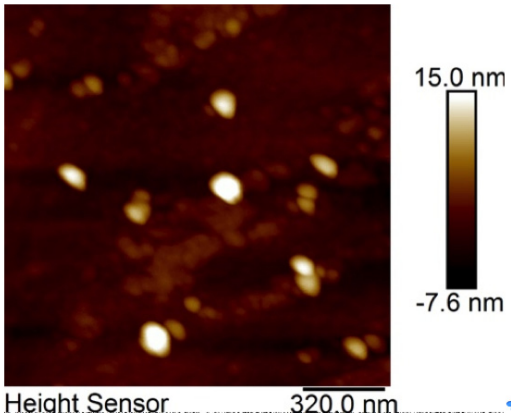


Рис. 3. АСМ-изображение поверхности фрагмента алмазной дифракционной решётки: **а** в областях необлучённой перегородки алмаза (светлая часть рисунка) и имплантированных ячеек (тёмные части рисунка), а также области решётки с наночастицами серебра.

структуры (ямки). На рис. 3б, при большем увеличении показано АСМ-изображение в области ячейки ДОЭ, в которой присутствуют синтезированные наночастицы серебра, подобно тому, как это наблюдалось на СЭМ-изображениях (рис. 2).

Формирование решётки на поверхности алмаза при его имплантации ионами серебра через поверхностную маску подтверждается при наблюдении образца на оптическом конфокальном микроскопе (рис. 4). В качестве зондирующего сигнала использовалось излучение полупроводникового лазера на длине волны 488 нм, а регистрация оптического изображения образца осуществлялась в спектральной области 508–526 нм через отсекающие фильтры. Воздействие изучения на длине волны 488 нм приводит к возбуждению люминесценции [16] или комбинационному рассеянию света алмаза в видимом зелёном диапазоне спектра. На рис. 4 показано оптическое 3D-изображение, полученное в результате излучения алмаза, на участках поверхности, закрытых во время имплантации маской. Области алмаза, подвергнутые имплантации (квадратные ячейки), практически не люминесцируют и поэтому выглядят на фигуре тёмными.

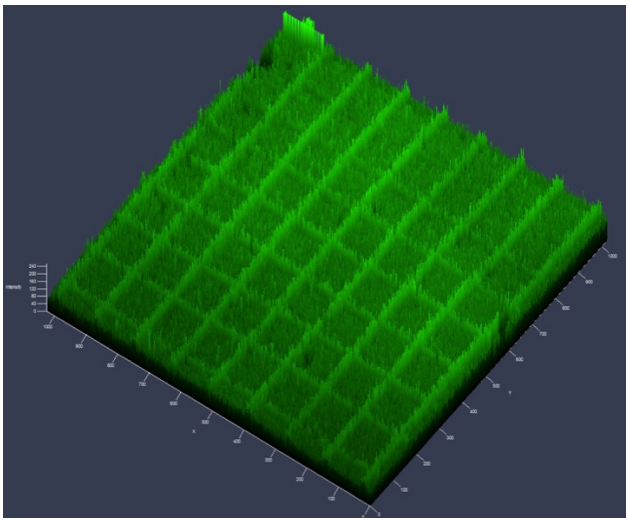


Рис. 4. 3D-изображение фрагмента алмазной решётки, наблюдаемое на оптическом конфокальном микроскопе.

Измерение спектров комбинационного рассеяния при возбуждении аргоновым лазером на длине волны 514 нм не указывает на образование в алмазе каких-либо графитизированных областей, как это было наблюдено, например, при имплантации алмаза при подобных усло-

а

б

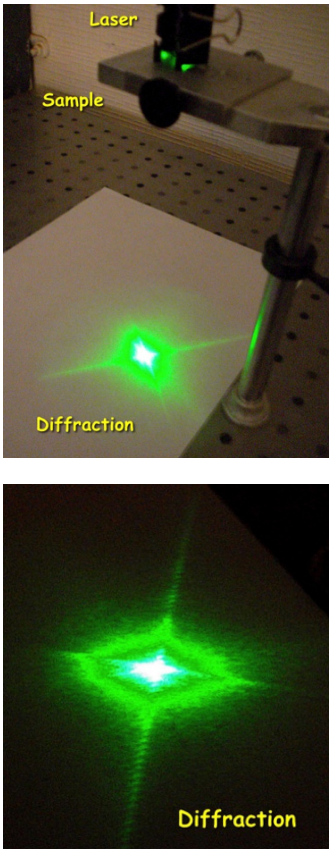


Рис. 5. Изображение картины дифракционного рассеяния на экране, полученное от алмазной решётки при зондировании зелёным лазером в геометрии “на пропускание”.

виях имплантации ионами бора [10, 11]. Объяснить это можно эффектом интенсивного распыления ионами серебра поверхности алмаза, при котором все разрушенные и графитизированные фрагменты алмаза в результате распыления удаляются из образца. При этом формируется профиль поверхности, но графитизированные элементы в структуре образца не сохраняются.

Имплантация алмаза ионами серебра ведёт к изменению фазового состава за счёт формирования наночастиц серебра. В результате имплантации алмаза через поверхностную маску формируется микроструктура с периодически изменяемым распределением оптических констант материала, т.е. между стенками решётки из алмаза и ячейками с наночастицами серебра. Поэтому сформированная на алмазе периодическая микроструктура с областями, содержащими металлические наночастицы может быть использована на практике в качестве двумерного фотонного кристалла или ДОЭ.

В качестве иллюстрации на рис. 5 приведено дифракционное изображение, регистрируемое при зондировании алмазной решётки полупроводниковым зелёным лазером в геометрии на пропускание. Очевидно, что, манипулируя режимами ионной имплантации, можно менять тем самым эффективный показатель преломления отдельных областей в ДОЭ, т.е. управлять его оптическими и дифракционными характеристиками.

Заключение

Таким образом, в настоящей работе впервые реализована низкоэнергетическая высокодозовая имплантация алмаза ионами серебра через поверхностную маску и предложена новая методика получения ДОЭ. В результате на поверхности алмаза получена дифракционная микроструктура, фазовый контраст в которой обеспечивается областями алмаза с плазмонными наночастицами серебра. Основным практическим применением предлагаемой методики формирования ДОЭ является развитие перспективной технологии и создания новых эффективных элементов алмазной оптики.

Ряд результатов по микроскопии был получен на оборудовании Междисциплинарного центра “Аналитическая микроскопия” Казанского (Приволжского) федерального университета.

Литература

1. Барноски М., Шмаонов Т.А. (ред.): Введение в интегральную оптику. М.: Мир 1977. 367 с.
2. Сойфер В.А.: Метод компьютерной оптики. М.: Физматлит 2003. 688 с.
3. Раткин Л.: Фотоника **4**, 18–23 (2011)
4. Коненко В.В., Конов В.И., Пименов С.М., Прохоров А.М., Павельев В.С., Сойфер В.А.: Квантовая электроника **26**, 9–10 (1999)
5. Karlsson M., Nikolajeff F.: Opt. Express **11**, 502–507 (2003)
6. Тукмаков К.Н., Володин Б.О., Павельев В.С., Комленок М.С., Хомич А.А.: Вестник Самарского аэрокосмического госуниверситета **7**, 112–116 (2012)
7. Shvydko Y., Stopin S., Blank V., Terentev S.: Nature Photonincs **5**, 539–542 (2011)
8. Верёвкин Ю.К., Бронникова Н.Г., Королихин В.В., Гущина Ю.Ю., Петряков В.Н., Филатов Д.О., Битюрин Н.М., Круглов А.В., Левичев В.В.: ЖТФ **73**, 99–102 (2003)
9. Волков А.В., Казанский Н.Л., Моисеев О.Ю., Сойфер В.А.: Способ изготовления дифракционных оптических элементов на алмазных и алмазноподобных подложках. Патент РФ 2197006, 2003.
10. Степанов А.Л., Нуждин В.И., Валеев В.Ф., Галяутдинов М.Ф., Курбатова Н.В., Воробьев В.В., Осин Ю.Н.: Алмазная дифракционная решётка. Патент РФ 166144, 2016.
11. Степанов А.Л., Нуждин В.И., Галяутдинов М.Ф., Курбатова Н.В., Валеев В.Ф., Воробьев В.В., Осин Ю.Н.: Письма ЖТФ **43**, вып. 2, 38–44 (2017)
12. Stepanov A.L., Galyautdinov M.F., Evlyukhin A.B., Nuzhdin V.I., Valeev V.F., Osin Y.N., Evlyukhin E.A., Kiyan R., Kavetskyy T.S., Chichkov B.N.: Appl. Phys. A **111**, 261–264 (2013)
13. Степанов А.Л., Нуждин В.И., Валеев В.Ф., Галяутдинов М.Ф., Осин Ю.Н.: Способ изготовления дифракционной решётки на полимерной основе. Патент РФ 2566371, 2015.
14. Степанов А.Л.: Фотонные среды с наночастицами, синтезированными ионной имплантацией. Саарбрюккен: Lambert Acad. Publ. 2014. 353 с.
15. Sankaran K.J., Chen H.C., Sundaravel B., Lee C.Y., Tai N.H., Lin I.N.: Appl. Phys. Lett. **102**, 61604-1–61604-1 (2013)
16. Van Beveren L.H.W., Liu R., Bowers H., Ganesan K., Johnson B.C., McCallum J.C.: J. Appl. Phys. **119**, 223902-1–223902-9 (2016)

Дилатометрия полиметилметакрилата при низких температурах

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

Отдел когерентной и нелинейной оптики, лаборатория квантовой оптики и информатики, группа нанооптики и наноплазмоники; лаборатория методов медицинской физики

Статья посвящена изучению коэффициента линейного теплового расширения полиметилметакрилата в температурном диапазоне от –194 °C до 0 °C. Для исследования применялся метод оптической дифракции, основанный на регистрации угловых изменении дифракционных максимумов, вызываемых увеличением или уменьшением периода специально созданной на поверхности образца дифракционной решётки за счёт теплового расширения.

Введение

Полиметилметакрилат (ПММА) становится материалом, без которого трудно представить современный мир. ПММА уверенно вытесняет обычное стекло при изготовлении оптических элементов приборов, оптоволокон, а также окон, иллюминаторов в авиа- и машиностроении и др. Основными факторами в пользу применения ПММА в промышленности являются его износостойкость, лёгкая обрабатываемость и плотность. И из-за хорошей спектральной прозрачности, ПММА как оптический материал, находит свое применение в широком интервале положительных и отрицательных температур. В литературе на сегодняшний день достаточно много экспериментальных и теоретических работ посвящённых изучению коэффициента линейного теплового расширения $\alpha(T)$ ПММА [1–3]. Но в данных работах исследования проводились при положительных температурах (°C). Например, в работе группы авторов [1] опубликованы результаты экспериментального анализа $\alpha(T)$ ПММА и его композитов в температурном диапазоне от 15 до 65 °C, а в работе [2] приводятся экспериментальные результаты и теоретические расчёты $\alpha(T)$ для того же полимера в области от 0 до 100 °C, которые описываются выражением $\alpha_{PMMA} = 5.2 \cdot 10^{-5} + 5.6 \cdot 10^{-7} T$ °C^{-1}. Отметим, что в обеих публикациях была получена положительная линейная зависимость $\alpha(T)$, т.е. с ростом температуры происходит увеличение размера ПММА.

Актуальность дилатометрического изучения $\alpha(T)$ ПММА при температурах ниже 0 °C вызвана возможностью применения ПММА в условиях экстремально низких температур: в открытом космосе, в криогенных установках, в лабораторных экспериментах и др. Как известно, при таких резких перепадах температур могут существенно изменяться размеры твёрдых тел из-за теплового расширения.

Для исследования зависимости $\alpha(T)$ ПММА при отрицательных температурах до –194 °C, в настоящей работе была применена методика оптической дифракции [4–7]. Данная методика была выбрана, чтобы показать её пригодность при подобных исследованиях.

Основными задачами, которые нужно было решить для проведения дилатометрических измерении при отрицательных температурах методом оптической дифракции являлись: создание качественной дифракционной решётки (ДР) на поверхности образца ПММА для получения чёткой дифракционной картины (ДК) и изготовление вакуумной камеры позволяющей проводить эксперименты без образования льда на поверхности исследуемого образца. Суть дифракционного дилатометрического метода заключается в получении $\alpha(T)$ из регистрации температуры образца и угла дифракции, соответствующей данной температуре. При повышении или понижении температуры образца ПММА оно либо расширяется, либо сжимается, тем самым вызывая изменение периода ДР. Соответствующее изменение периода ДР приводит к изменению угла дифракции дифракционных максимумов ДК. Следовательно, регистрация изменения угла дифракции дифракционных максимумов даёт нам информацию о величине периода ДР в процессе теплового расширения. Для оценки угла дифракции дифракционных максимумов регистрировалось смещение проекции пучка на контрольной плоскости. Таким образом, измерив положение проекции дифракционного пучка на выбранной плоскости и измерив температуру образца можно было определить $\alpha(T)$.

Подготовка образцов

Оптимальными размерами образцов для исследования в вакуумной камере с криостатом были ширина 5 мм и длина 10 мм (рис. 1а). Толщина могла варьироваться в пределах 1–4 мм. В наших экспериментах была использована пластина ПММА толщиной 2 мм. На образцах с одной стороны создавалась фазовая ДР методом реплики с периодом 4 мкм. Эталоном для изготовления ДР на поверхности образцов ПММА являлась фазовая ДР периодом 4 мкм формированная на пластине Si (рис. 1б). Тонкий слой жидкого ПММА наносился на поверхность пластины ПММА и прижимался пластиной Si. После полного затвердевания слоя жидкого ПММА, структура ПММА-Si помещалась в жидкий азот, и вследствие раз-

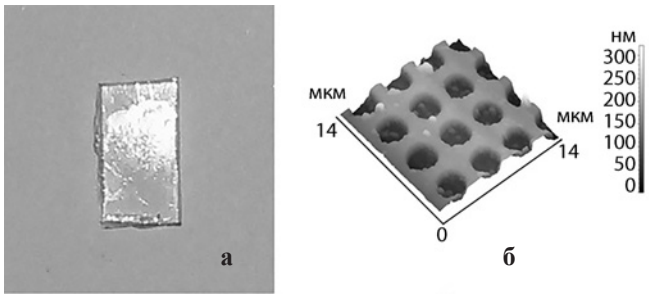


Рис. 1. а Фотография исследуемого образца ПММА; **б** микроструктура ДР на Si пластине с помощью которой создавалась ДР с периодом 4 мкм на поверхности ПММА.

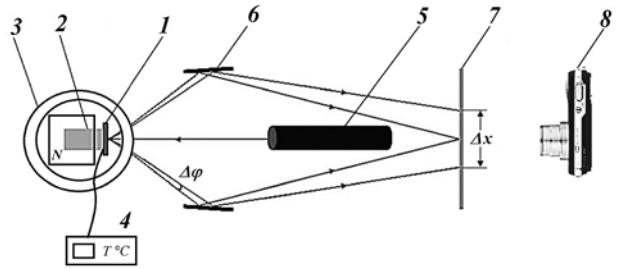


Рис. 3. Схема экспериментальной установки для исследования α(T) ПММА. 1 – образец с ДР, 2 – медный держатель образца, 3 – вакуумная камера, 4 – термопара, 5 – He-Ne лазер, 6 – зеркало, 7 – контрольный экран, 8 – цифровая фотокамера. Δx – расстояние смещения симметричных дифракционных максимумов пятого порядка друг относительно друга на контрольном экране.

ницы в коэффициентах объёмного теплового расширения между ПММА и Si слой ПММА с ДР отслаивался от поверхности Si. Таким образом на поверхности образца была получена реплика ДР – точная копия решётки на Si пластине.

При зондировании данной ДР He-Ne лазером на длине волны 0.6328 мкм получается чёткая ДК как на отражение, так и на пропускание (рис. 2). Интенсивность дифракционных максимумов ДР зависит от глубины рельефа h периодической структуры и показателя преломления n ПММА. В нашем случае $h \approx 200$ нм, $n = 1.5$.

Эксперимент

Схема экспериментальной установки для исследования α(T) для ПММА в температурном диапазоне от –194 до 0 °C представлена на рис. 3. Охлаждение образца ПММА (1) прикреплённого к медному держателю (2), проводилось жидким азотом в специальной вакуумной камере (3) с прозрачными окнами для обеспечения возможности зондирования и регистрации определённых симметричных дифракционных максимумов при лазерном облучении. Образец помещался в вакуумную камеру для предотвращения возникновения конденсата и образования льда на его поверхности.

Температура образца контролировалась с точностью ±2 °C термопарой (4), подсоединённой к медному держателю (2). Оптическое зондирование ПММА с ДР производилось на отражение He-Ne лазером ЛГН-111 (5) на длине волны λ = 0.6328 мкм при нормальном падении луча лазера на поверхность образца. Два симметричных дифракционных максимума 5-го порядка с помощью зеркал (6) совмещались на контрольном экране (7). Расстояние оптического пути от поверхности образца до экрана L составляло 1.4 м. Диаметр лазерного пятна на экране при таком расстоянии составлял 5 мм. В процессе постепенного охлаждения образца, происходило уменьшение периода ДР и, соответственно, смещение положения дифракционных пучков на экране друг относительно друга. Смещение регистрировалось цифровой камерой Exilim ex-f1 (8) через каждые 20 °C изменения температуры образца. По изменению расстояния между положениями дифракционных максимумов (Δx) 5-го порядка на контрольном экране и показаниям термопары определялась α(T).

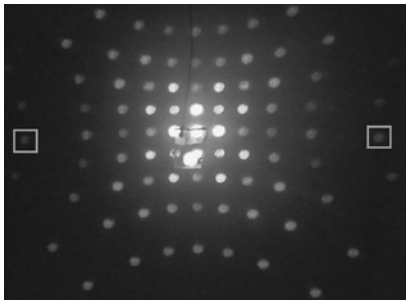


Рис. 2. Дифракционная картина, наблюдаемая на контрольном экране при зондировании образца ПММА He-Ne лазером на длине волны 0.6328 мкм на отражение. Прямоугольниками выделены пятые дифракционные максимумы.

Выражение, связывающее изменение температуры материала ΔT, смещения дифракционных пучков Δx на контрольном экране и α(T) приведено ниже:

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

где d – период ДР, k – порядок дифракционного максимума, λ – длина волны зондирующего лазера, L – оптическая длина пути пучка дифракционного максимума пятого порядка от образца до экрана. Выражение (1) получается из уравнения линейного теплового расширения твёрдого тела и уравнения дифракции для плоской волны [5].

Результаты и обсуждения

На рис. 4а показаны фотоснимки, на которых наблюдается смещение положения максимумов ДР на контрольном экране, и соответствующие этим смещениям значения температур для ПММА с ДР, по которым определялась зависимость α(T). Зависимость α(T) в температурном

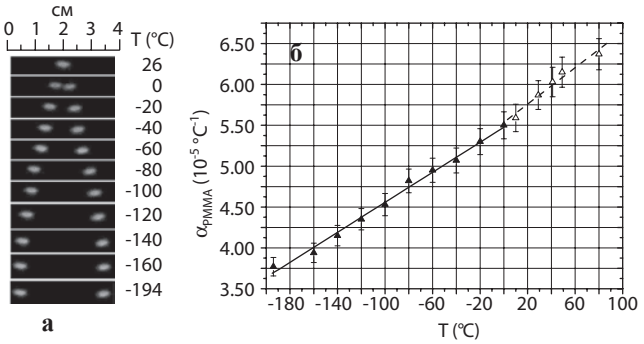


Рис 4. а Фотоснимки, демонстрирующие смещения дифракционных максимумов 5-го порядка на контрольном экране; **б** график α(T) ПММА (сплошная линия). Так же для сравнения приведён график α(T) ПММА, полученный при положительных температурах [2] (штриховая линия).

диапазоне от –194 до 0 °C, полученная из выражения (1), представлена на рис. 4б. Как видно из рисунка, график имеет линейный характер, т.е. с уменьшением температуры образец ПММА сжимается. Полученный линейный график (рис. 4б) можно описать функцией (2):

$$\alpha(T) = 5.47 \cdot 10^{-5} + 0.92 \cdot 10^{-7} T \ °C^{-1} \quad (2)$$

Так же для сравнения на рис. 4б приведён график α(T) ПММА полученный при положительных температурах [2].

Заключение

Впервые проведены дилатометрические измерения ПММА при температуре ниже 0 °C. Установлено, что в температурном диапазоне от –194 до 0 °C значения α(T) ПММА изменяется по линейному закону. Полученные результаты измерения α(T) ПММА методом оптической дифракции показывают принципиальную возможность измерения α(T) твёрдых тел (полимеров) при низких температурах. Работа частично поддержана грантом РФФИ № 15-48-02525_поволжье.

Литература

1. Jindal P., Gupta Sh., Bansal S., Gairola S., Pandey S.K., Singh A.P., Bhandari R.: IJRMET. **4**, No. 2, 72–74 (2014)
2. Goods S.H., Watson R.M.: Thermal Expansion and Hydration Behavior of PMMA Molding Materials for LIGA Applications. California: Sandia National Laboratories 2003. p. 57.
3. Hadač J., Slobodian P., Sáha P., Řiha P.: Chemické listy **108**, No. 1, s50–s58 (2014)
4. Магунов А.Н.: Лазерная термометрия твёрдых тел. М.: Физматлит 2001. с. 224.
5. Галяутдинов М.Ф., Фаррахов Б.Ф., Фаттахов Я.В., Захаров М.В.: Опт. и спектр. **107**, № 4, 675–680 (2009)
6. Фаррахов Б.Ф., Фаттахов Я.В., Галяутдинов М.Ф., Степанов А.Л.: Материаловедение **2**, 55–57 (2017)
7. Галяутдинов М.Ф., Нуждин В.И., Фаттахов Я.В., Фаррахов Б.Ф., Валеев В.Ф., Осин Ю.Н., Степанов А.Л.: Письма ЖТФ **42**, №. 4, 30–37 (2016)

Воздействие импульсных лазерных и ионных пучков на вакуумно-осаждённые слои Ge:Sb на подложках Ge. Расчёты и эксперимент

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

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

Формирование сильнолегированных эпитаксиальных слоёв n^+-Ge:Sb на подложках p-Ge проведено путём распыления мишени <Sb/Ge> низкоэнергетичным (E = 1 кэВ) и сильноточным (j = 150 мкА/см^2) ионным пучком (Xe^+) с последующим облучением осаждённых аморфных плёнок (толщиной 150 и 300 нм) наносекундными лазерными (λ = 0.69 мкм) или ионными (C^+, H^+) пучками. В процессе лазерного отжига осуществлялось оптическое зондирование облучаемой области с регистрацией отражения $R(t)$ пробного пучка для контроля фазового состояния плёнки. В зависимости от глубины расплава формировались поликристаллические либо эпитаксиальные слои Ge:Sb. Также проводилось компьютерное моделирование нагрева и фазовых переходов аморфной плёнки Ge на кристаллической Ge подложке и диффузии примеси Sb в расплаве Ge. Показано, что благодаря большей глубине и длительности существования расплава при воздействии мощными ионными пучками примесь Sb диффундирует вплоть до глубины 1.4 мкм. Результаты моделирования хорошо согласуются с экспериментом.

Введение

В настоящее время сильно легированные слои Ge n- и p-типа проводимости ($N \geq 10^{20}$ см$^{-3}$) представляют большой научно-технологический интерес благодаря возможности создания на их основе новых функциональных приборов микроэлектроники (полевые транзисторы) [1], сенсорики (детекторы химических и биологических веществ) [2], фотоники (светодиоды, инжекционные лазеры и фотоприёмники ИК диапазона) [3, 4]. Для создания слоёв с высоким уровнем легирования, значительно превышающим равновесную растворимость электроактивных примесей в Ge, необходимо применение неравновесных методов легирования и отжига, таких как молекулярно-лучевая эпитаксия [5], ионная имплантация [6], наносекундный лазерный отжиг [7, 8].

Наряду с импульсным лазерным воздействием, отжиг имплантированных или легированных в процессе роста слоёв Ge может быть проведён мощными импульсными ионными пучками, например углеродом или протонами. Такой способ отжига характеризуется более однородным по глубине выделением энергии в веществе (в сравнении с лазерным), большей глубиной обработки (до 2 мкм), практически полным поглощением падающего энергетического потока (нет потерь на отражение). При этом сохраняются преимущества лазерного отжига в плане высокой электрической активации внедрённой примеси [9, 10].

Ранее нами была продемонстрирована возможность кристаллизации вакуумно-осаждённых ионным распылением плёнок Ge:Sb толщиной $d \sim 200$ нм на подложках Si, SiO_2 и Al_2O_3 [8]. Получаемые при этом плёнки обладали высокой деформацией растяжения ε = 0.7–1% и высокой концентрацией электронов проводимости $N_e = (3 \div 5) \cdot 10^{20}$ см$^{-3}$, однако имели поликристаллическую структуру. В данной работе изучалась возможность получения эпитаксиальных слоёв n-Ge:Sb на подложках p-Ge при импульсных воздействиях лазерными или ионными пучками на аморфные слои Ge:Sb различной толщины. Наряду с экспериментом проводилось компьютерное моделирование импульсного нагрева и инициируемых им фазовых переходов в аморфной плёнке на кристаллической подложке, а также диффузии примеси Sb в жидкой фазе Ge.

Эксперимент

В качестве подложек использовались монокристаллы p-Ge(111) с удельным сопротивлением 30 Ом·см. Осаждение плёнок Ge:Sb на подложки p-Ge проводилось путём распыления композитной мишени <Sb/Ge> низкоэнергетичным (E = 1 кэВ) и сильноточным (j = 150 мкА/см^2) пучком ионов ксенона (Xe^+). Схема процесса осаждения и его детали приведены в работе [8]. Толщина аморфных плёнок Ge:Sb составляла d_1 = 150 нм и d_2 = 300 нм. Концентрация атомов Sb в плёнках N_{Sb} составляла $(1 \div 2) \cdot 10^{20}$ см$^{-3}$.

Для кристаллизации аморфных плёнок Ge:Sb применялся однократный импульсный лазерный отжиг (ИЛО) на воздухе излучением рубинового лазера на λ = 0.694 мкм. Длительность лазерного импульса была τ_p = 80 нс, плотность энергии в импульсе составляла W = 0.6–1.2 Дж/см^2. Неоднородность распределения энергии по сечению лазерного пятна диаметром 4 мм была не выше ±5%. Также применялась импульсная ионная обработка (ИИО) плёнок Ge:Sb мощным ионным пучком, состоящим преимущественно из ионов углерода (C^+ ~ 80%) и водорода (H^+ ~ 20%), в камере сильноточного ионного

ускорителя ТЕМП при уровне вакуума $p \sim 4 \cdot 10^{-4}$ Торр. Максимальная энергия ионов в импульсе была E_{max} = 300 кэВ, длительность импульса τ_p = 80 нс, плотность энергии в импульсе W = 0.8–1.2 Дж/см^2. Неоднородность распределения энергии по сечению ионного пучка диаметром 2 см была не выше ±10%. При этом доза вводимых ионов C^+ и H^+ за один импульс не превышает 10^{13} см$^{-2}$, а сама обработка характеризуется интенсивным и объёмным (в отличие от ИЛО) выделением энергии в области пробега ионов (~1 мкм).

В процессе ИЛО посредством скоростных ФЭУ и цифрового осциллографа регистрировалась динамика $R(t)$ отражения от плёнки зондирующего излучения на λ = 1.06 и 0.53 мкм с целью диагностики лазерно-индуцированных фазовых переходов. Оптическая схема установки лазерного отжига (БГУ, Минск) и методика диагностики описаны в работе [11]. Кристаллическая структура и фазовый состав плёнок Ge:Sb исследовались методом рентгеновской дифракции в скользящих лучах (РДСЛ) на дифрактометре ДРОН-7 при углах падения φ = 1–3° рентгеновского излучения CuK_α с длиной волны λ = 1.542 Å. Морфология поверхности осаждённых и облучённых плёнок изучалась на сканирующем электронном микроскопе Carl Zeiss EVO50.

Глубинное распределение атомов Ge и Sb в осаждённых образцах до и после импульсных воздействий исследовалось методом время-пролетной вторичной ионной масс-спектрометрии (ВИМС) на установке TOF. SIMS5 (IONTOF) путём послойного ионного травления. Уровень вакуума в камере в процессе измерений составлял $p \sim 10^{-10}$ Торр. Травление поверхности и её анализ проводились синхронным чередованием импульсных пучков ионов Cs^+ (1 кэВ, 70 нА) и Bi^+ (25 кэВ, 1 пА), соответственно.

Компьютерное моделирование

Моделирование процессов нагрева при импульсных обработках

Решалось одномерное уравнение для нестационарного температурного поля в Ge пластине, вызванного воздействием излучения:

$$\rho C(T)\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x}\left(K(T)\frac{\partial T(x,t)}{\partial x}\right) = Q(x,t,T) \qquad (1)$$

с начальными и граничными условиями на поверхностях Ge пластины толщиной h:

$$T(x,0) = T(h,0) = T_0\,, \quad \frac{\partial T(0,t)}{\partial x} = \frac{\partial T(h,t)}{\partial x} = 0. \qquad (2)$$

На границе раздела твёрдой и жидкой фаз $l(t)$ температура плавления (T_m) задаётся для кристаллического или для аморфного Ge. Разность тепловых потоков определяет скорость движения границы раздела с теплотой плавления материала H.

$$l(t) = 0 \text{ для } t < t_{m1} \text{ и } t < t_{m2} \qquad (3)$$

$$T(l(t),\, t) = T_m \text{ для } t_{m1} < t < t_{m2}$$

$$K(T)\frac{\partial T(x,t)}{\partial x}\bigg|_{x=l(t)+0} - K(T)\frac{\partial T(x,t)}{\partial x}\bigg|_{x=l(t)-0} = H\rho\frac{\partial l(t)}{\partial t}\,. \qquad (4)$$

Здесь T_0 – температура окружающей среды, $K(T)$, ρ, C – коэффициент теплопроводности, плотность, удельная теплоёмкость, соответственно, $Q(x,t,T)$ – плотность источников тепла, t_{m1}, t_{m2} – время начала и время окончания плавления.

При численном решении задачи методом конечных разностей [12] использовались хорошо известные теплофизические и оптические параметры монокристаллического Ge и их зависимости от температуры. Что касается аморфных плёнок, нанесённых на монокристаллический Ge, то использовались наиболее сильно влияющие на нагрев параметры, такие как пониженная теплопроводность (K = 0.02 Вт/см · К) и пониженная точка плавления и кристаллизации (T_m = 700 °C) [13].

Основным различием лазерного и ионно-импульсного нагрева является пространственно-временное распределение поглощённой энергии излучения. При поглощении лазерного излучения плотность источников тепла (количество выделяемой энергии в единицу времени в единице объёма) имеет вид:

$$Q(x,t) = I_0(t)(1-R)\alpha\exp(-\alpha x)\,, \qquad (5)$$

где $I_0(t)$ – плотность мощности излучения, R и α – коэффициенты отражения и поглощения света, соответственно.

В проведённых нами расчётах использовалась экспоненциально-степенная зависимость плотности мощности лазерного излучения от времени:

$$I_0(t) = W\frac{128}{3\tau_p^*}\left[\frac{t}{\tau_p^*}\exp\left(-\frac{t}{\tau_p^*}\right)\right]^4. \qquad (6)$$

Эта форма импульса выражена через измеряемые параметры пучка – плотность энергии импульса W и передний фронт импульса τ_p^*, связанный с длительностью импульса τ_p на полувысоте (FWHM) соотношением $\tau_p = 1.19\tau_p^*$. В отличие от ранее проведённых расчётов с Гауссовой формой импульса [14], данная форма характерна для многих импульсных световых источников и характеризуется более резким подъёмом на переднем фронте импульса. В проводимых расчётах это различие временных форм импульса не оказывает заметного влияния на глубину плавления и время существования расплава.

В отличие от ИЛО, плотность источников тепла, возникающих в материале при ИИО, не зависит от оптических параметров материала и слабо зависит от изменения его фазового состояния. Однако, в ионном пучке одновременно изменяется как энергия ионов, так и плотность потока ионов. Потери энергии ионов также

зависят от их распределения по глубине. В этом случае плотность источников тепла может быть записана как:

$$Q(x,t) = N(t) f(x, E(t)) = \frac{j(t)}{e} f(x, E(t)) . \quad (7)$$

Здесь $N(t)$ – плотность потока ионов, $j(t)$ – плотность тока ионов, e – заряд электрона (иона), $f(x,E(t))$ – пространственная функция распределения энергетических потерь ионов, зависящая от энергии падающих на поверхность ионов $E(t)$.

При расчётах температурных полей мы считали, что пучок ионов, в основном, содержит ионы C^+ (80%) и H^+ (20%), следовательно

$$f(x, E(t)) = 0.8 f_C(x, E(t)) + 0.2 f_H(x, E(t)) , \quad (8)$$

где f_C и f_H – функции распределения энергетических потерь для C^+ и H^+ в области их пробегов, соответственно. Детальный вид f_C и f_H был рассчитан с использованием программы SRIM методом Монте-Карло. Как показывают оценки функций распределения f_C и f_H по глубине, максимум выделенной энергии находится в глубине и с увеличением энергии импульса смещается вглубь кристалла. Причём характер распределения энергетических потерь определяется массой иона. Для упрощения задачи распределение потерь ионов полагалось равномерным в области пробега ионов R_C и R_H:

$$f(x,t)_{C,H} = \frac{E(t)}{R_{C,H}} \text{ для } x \le R_{C,H} \text{ и}$$
$$f(x,t)_{C,H} = 0 \text{ для } x > R_{C,H} . \quad (9)$$

Для Ge зависимость пробега от энергии ионов ($R_{C,H}$ в см, E в эВ) определялась выражениями: $R_C = 2.1 \cdot 10^{-10} E(t)$, $R_H = 8.8 \cdot 10^{-10} E(t)$. Например, при максимальной энергии в импульсе E_{max} = 300 кэВ пробеги ионов составляют: R_C = 0.6 мкм и R_H = 2.6 мкм, что согласуется с данными по программе SRIM.

Временная форма плотности ионного тока и энергии ионов аппроксимировалась экспоненциально-степенными функциями $j(t)$, $E(t) \sim t^2 \exp(-2t)$. Временная форма энергии ионов выражается через экспериментально определяемые параметры $t_0 = t_p/1.696$, где t_0 – длительность переднего фронта импульса, t_p – длительность импульса на полувысоте (FWHM) и максимальное значение энергии ионов $E_{max} = E(t_0)$:

$$E(t) = \frac{E_{max}}{\exp(-2)} \left[\frac{t}{t_0} \exp\left(-\frac{t}{t_0} \right) \right]^2 . \quad (10)$$

Плотность тепловых источников находится из условия нормировки к экспериментально измеряемой плотности энергии ионного импульса:

$$Q(x,t) = \frac{128 \exp(-2) W}{3 t_0 E_{max}} \left[\frac{t}{t_o} \exp\left(-\frac{t}{t_0} \right) \right]^2 \times \left[0.8 f_C(x, E(t)) + 0.2 f_H(x, E(t)) \right] \quad (11)$$

Моделирование диффузии примеси Sb в Ge при импульсных обработках

Задача диффузионного перераспределения примеси под действием импульсных лазерных и ионных пучков решалась лишь для области, находящейся в расплавленном состоянии, поскольку диффузионная длина для большинства примесей в твёрдой фазе значительно меньше толщины нагреваемых слоёв $(Dt_p)^{0.5} \ll L$, где D – коэффициент диффузии примеси.

Распределение примеси из плёнки Ge:Sb было получено путём решения одномерного дифференциального уравнения диффузии при отсутствии потока примеси с поверхностей. В качестве начального условия взято равномерное распределение Sb в осаждённой аморфной плёнке толщиной d_a: $C = C_0$ для $x \le d_a$ и $C = 0$ для $x > d_a$. Величина $C_0 = 1.5 \cdot 10^{20}$ см$^{-3}$ бралась из данных ВИМС измерений. В отдельных случаях учитывалась модуляция профиля атомов Sb по глубине плёнки Ge, обусловленная неравномерностью примеси на поверхности распыляемой мишени и вращением образцов [8]. При этом начальный профиль распределения примеси Sb задавался синусоидальной функцией вида:

$$C(x) = C_0 \left(1 + M \sin\left(\frac{2\pi N x}{d_a} \right) \right) \quad (12)$$

для $x \le d_a$, где M – глубина модуляции (процент отклонения от C_0), N – число максимумов в аморфном слое толщиной d_a. В случае равномерного исходного распределения примеси в плёнке и диффузии в полубесконечной среде задача имеет аналитические решения [12]. Однако в нашем случае координата границы расплава изменяется во времени: при плавлении толщина расплава растёт, а при затвердевании расплава падает. Поэтому данная задача решалась методом конечных разностей с учётом подвижной границы раздела твёрдой и жидкой фаз. При этом поток примеси на границе расплав-кристалл не учитывался, т.е. коэффициент распределения примеси полагался равным единице (отсутствие сегрегации), что характерно для быстрой кристаллизации из расплава слоёв с хорошо растворимыми примесями. Временные зависимости глубины расплава определялись из предварительно проведённого моделирования температурных полей.

Результаты и обсуждение

Рассмотрим результаты расчётов нагрева приповерхностных слоёв Ge при ИЛО и ИИО. На рис. 1 приведены

расчётные данные для глубины расплава и температуры на поверхности осаждённых плёнок Ge:Sb различной толщины (150 и 300 нм) в зависимости от времени с начала действия лазерного импульса длительностью τ_p = 80 нс с плотностью энергии W = 0.6, 0.8 и 1.0 Дж/см^2. Из рис. 1а видно, что расплав Ge начинает формироваться с момента времени t ~ 40 нс. При W = 0.8 Дж/см^2 глубина расплава равна толщине осаждённой плёнки (d_1 = 150 нм), а температура на её поверхности заметно превышает точку плавления аморфного Ge (рис. 1б). При этом время существования расплава составляет τ_m ~ 200 нс. Повышение W до 1.0 Дж/см^2 приводит к росту глубины расплава до ~200 нм, повышению температуры на поверхности плёнки (до ~1100 °C) с достижением точки плавления кристаллического Ge (940 °C) на границе с подложкой. Однако при этом время существования расплава практически не меняется (τ_m ~ 200 нс), а спад расчётной кривой расплава становится чуть более резким в сравнении с предыдущим случаем (W = 0.8 Дж/см^2). Некоторое повышение скорости кристаллизации (V ~ 1.7 м/с) связано с более высокой температурой кристаллизации (940 °C) по сравнению с температурой кристаллизации из переохлаждённого расплава (700 °C).

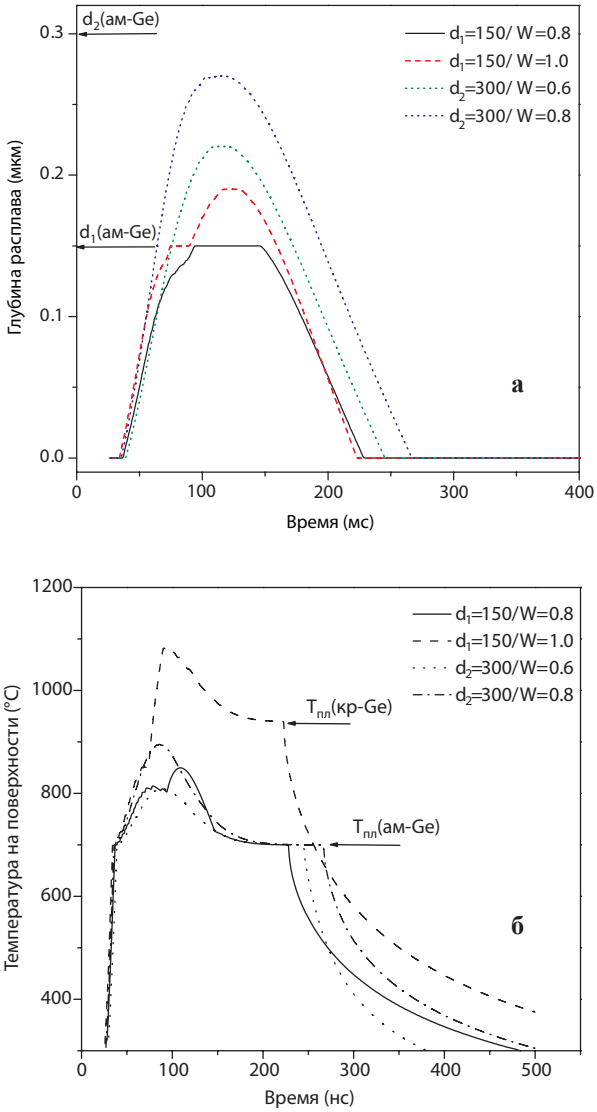


Рис. 1. Зависимость расчётной глубины расплава в плёнках аморфного Ge различной толщины (d_1 = 150 нм и d_2 = 300 нм) (**а**) и температуры на поверхности плёнок (**б**) от времени при ИЛО с плотностью энергии W = 0.6–1.0 Дж/см^2. Стрелки указывают на толщину осаждённых слоёв и температуру плавления аморфного и кристаллического Ge.

В случае более толстой осаждённой плёнки (d_2 = 300 нм) расчёты показывают, что плотностей энергии W = 0.6 и 0.8 Дж/см^2 недостаточно для полного плавления аморфного слоя (максимальная глубина расплава l ~ 270 нм) и достижения температуры плавления кристаллической подложки. При этом длительность существования расплава составляет τ_m ~ 210 и 230 нс. Таким образом, из расчётных данных (рис. 1) следует, что для приведённых режимов осаждения и лазерного отжига условия для эпитаксиального роста плёнки Ge:Sb на подложке Ge создаются для случая d_1 = 150 нм и W = 0.8–1.0 Дж/см^2.

На рис. 2 приведены расчётные данные при воздействии импульсных ионных пучков на осаждённые слои Ge:Sb толщиной d_2 = 300 нм. Видно, что плотности энергии W = 0.4 Дж/см^2 уже достаточно, чтобы глубина расплава достигла толщины всего аморфного слоя, а температура на поверхности слоя достигла точки плавления кристаллической Ge подложки. При ИИО глубина расплава значительно выше, чем при ИЛО, проникая вглубь Ge подложки до l ~ 1.4 мкм при W = 1.0 Дж/см^2, а температура на поверхности приближается к точке кипения Ge (2830 °C). Также длительность существования расплава при ИИО значительно выше, чем при ИЛО, достигая значений τ_m ~ 1.5 мкс при W = 1.0 Дж/см^2. Скорость кристаллизации при этом ниже, чем при ИЛО, составляя V ~ 1 м/с.

Далее будут приведены экспериментальные данные по динамике отражения $R(t)$ на длине волны λ = 1.064 мкм слоёв Ge:Sb в процессе ИЛО. На рис. 3 показаны осциллограммы отражательной способности во времени с момента действия лазерного импульса на слои Ge:Sb различной толщины. Рассмотрим поведение отражения для слоя Ge:Sb меньшей толщины (150 нм) при ИЛО с W = 0.8 Дж/см^2 (рис. 3а). Начальный участок кривой $R(t)$, длящийся менее 40 нс, соответствует отражению от исходной аморфной плёнки. Дальнейший резкий рост отражения связан с интенсивным нагревом слоя и появлением на его поверхности жидкой фазы Ge, проявляющей металлический характер отражения ($R \geq 70\%$). Последующий спад отражения, до уровня сравнимого с первоначальным, соответствует фазе кристаллизации расплава вследствие быстрого оттока тепла вглубь Ge подложки. Длительность фазы расплава, определяемая на полувысоте кривой, составляет τ_m ~ 200 нс, что хорошо совпадает с расчётными данными (рис. 1).

Повышение величины W до 1.0 Дж/см^2 приводит к изменению формы кривой отражения. В области повышенного отражения появляются два пика, а уровень

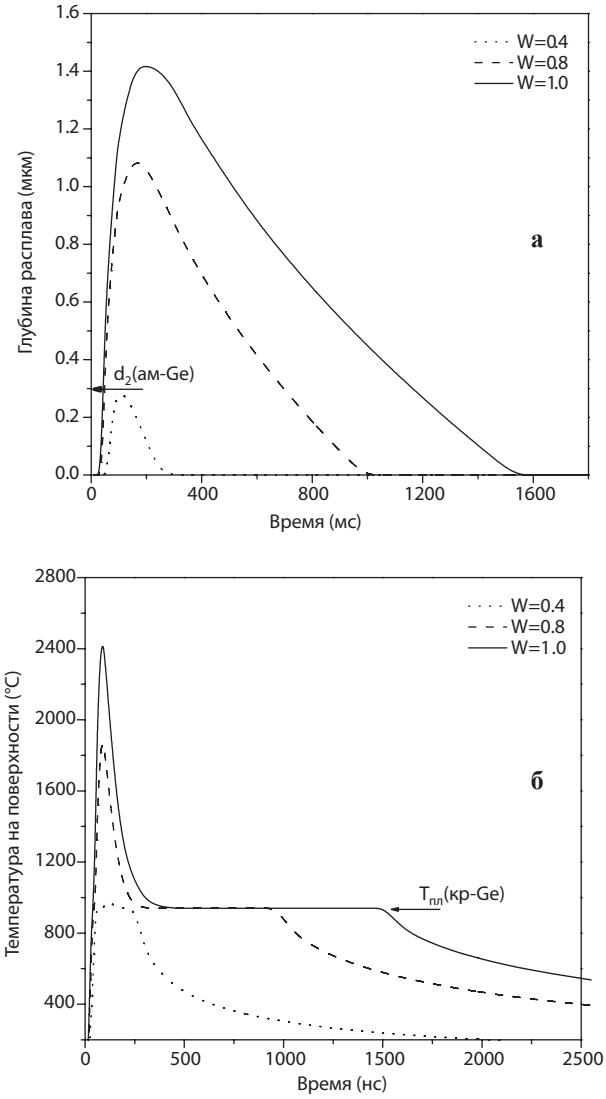


Рис. 2. Зависимость расчётной глубины расплава в аморфной плёнке и кристалле Ge (**а**) и температуры на её поверхности (**б**) от времени при ИИО с плотностью энергии W = 0.4, 0.8 и 1.0 Дж/см^2. Стрелки указывают на толщину осаждённой плёнки и температуру плавления кристаллического Ge.

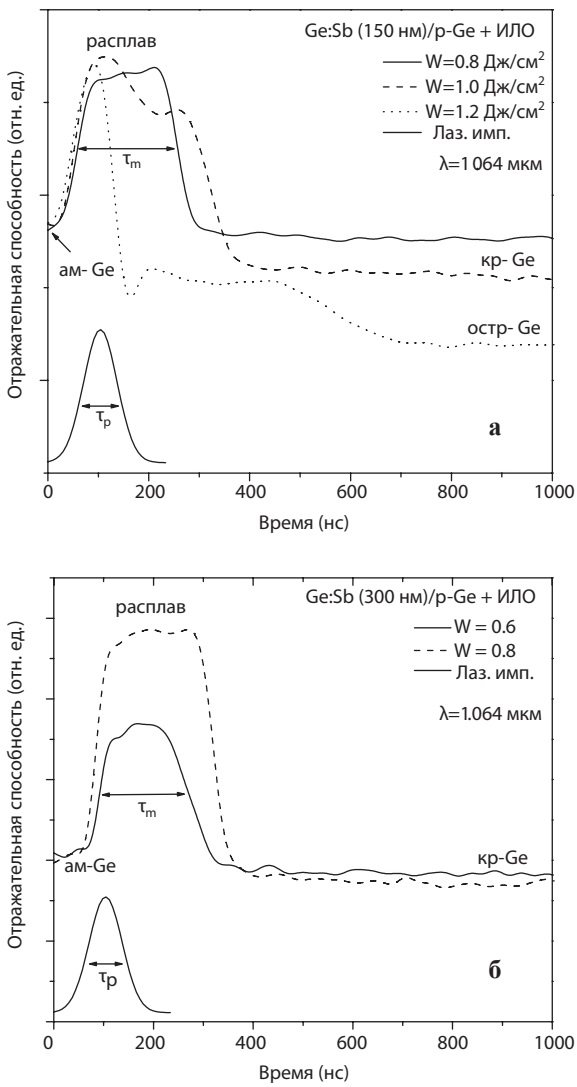


Рис. 3. Осциллограммы отражательной способности $R(t)$ на длине волны λ = 1.064 мкм в процессе ИЛО аморфной плёнки Ge толщиной 150 нм (**а**) и 300 нм (**б**) с плотностью энергии W = 0.6 и 0.8 Дж/см^2. Также приведена временная форма лазерного импульса.

отражения на конечной стадии становится заметно ниже первоначального. Такое поведение может быть связано с процессом разрыва расплава на отдельные фрагменты, которые при затвердевании образуют островковые структуры, дающие повышенное диффузное рассеяние света [20, 23]. Образование таких островковых структур вероятно связано с неидеальной адгезией осаждённой плёнки к подложке (например, из-за наличия тонких оксидных слоёв на границе раздела), что затрудняет смачивание подложки расплавом. Дальнейший рост W до 1.2 Дж/см^2 приводит к значительному сокращению времени существования сплошного расплава (до ~80 нс) и образованию достаточно протяжённой во времени (~400 нс) фазы островкового расплава.

В случае облучения лазером более толстой плёнки Ge:Sb (300 нм) с плотностью энергии W = 0.6 и 0.8 Дж/см^2 форма кривых отражения в целом идентична, различие наблюдается в амплитуде и ширине сигнала, а также в крутизне спада заднего фронта (рис. 3б). Пониженная амплитуда и ширина сигнала при W = 0.6 Дж/см^2 связана с частичным плавлением аморфной плёнки, которое согласно расчётам составляет 220 нм (рис. 1а). При этом длительность расплава, составляющая τ_m ~ 180 нс, близка к расчётной (τ_m ~ 210 нс). Более пологий спад заднего фронта означает меньшую скорость кристаллизации из-за наличия слоя аморфного Ge с пониженной теплопроводностью. Повышение амплитуды и ширины сигнала, а также более резкий спад заднего фронта при ИЛО с W = 0.8 Дж/см^2 свидетельствуют о расширении зоны расплава на большую часть аморфной плёнки. При этом есть хорошее совпадение в длительности расплава между расчётом и экспериментом (τ_m ~ 230 нс).

Далее будет проведено сравнение экспериментальных и расчётных данных по диффузионному перераспределению примеси Sb в Ge в процессе импульсного отжига плёнки толщиной 300 нм. Измерения методом ВИМС показали, что исходная концентрация атомов Sb в осаждённой плёнке Ge характеризуется модуляцией состава по глубине (период модуляции ~25 нм) относительно усредненной концентрации $C_0 = 1.5 \cdot 10^{20}$ см$^{-3}$ (рис. 4). Такая модуляция обусловлена вращением подложки и неравномерным расположением таблеток Sb на распыляемой мишени Ge [8]. ИЛО с $W = 0.8$ Дж/см^2 приводит к выравниванию профиля Sb по глубине в пределах осаждённой плёнки (не показано) за счёт её плавления и диффузии Sb в образовавшемся расплаве. Моделирование профиля Sb в результате ИЛО показало, что модуляция профиля полностью устраняется при задании коэффициента диффузии Sb в жидкой фазе $D = 2 \cdot 10^{-5}$ см^2/с. В отличие от ИЛО, ИИО осаждённой плёнки привела к значительной диффузии примеси Sb вглубь кристалла Ge на глубину до 1.4 мкм при уровне детектируемой концентрации 10^{17} см$^{-3}$ (рис. 4). Такая глубокая диффузия обусловлена большей глубиной расплава и более продолжительным временем его существованием (рис. 2). Моделирование такого профиля показало, что согласие с экспериментом имеет место при величине коэффициента диффузии Sb в жидком Ge $D = 2 \cdot 10^{-3}$ см^2/с. Эта величина на порядок превышает значения ($D \sim 10^{-4}$ см^2/с), полученные при ИЛО осаждённых или имплантированных слоёв [6]. Однако стоит учесть, что при ИИО диффузия происходит при температуре, значительно превышающей точку плавления Ge (940 °C).

Рассмотрим воздействие ИЛО и ИИО на кристаллическую структуру и морфологию осаждённых слоёв. После вакуумного осаждения слои Ge:Sb различных толщин имели аморфную структуру ввиду отсутствия подогрева подложки [8, 14]. ИЛО тонкой плёнки (d_1 = 150 нм) с $W = 0.8$ Дж/см^2 привёл к образованию эпитаксиального слоя Ge:Sb, что видно по низкой интенсивности пиков в спектре РДСЛ (рис. 5). Дополнительным подтверждением этого являются измерения на электронографе ЭМР-100, которые показали дифракционную картину с точечными рефлексами, характерную для монокристалла. Причиной образования эпитаксиального слоя является полное плавление аморфной плёнки и некоторое проникновение расплава в монокристаллическую Ge подложку (рис. 1а), служащую основой для эпитаксии. При этом СЭМ измерения показали достаточно однородную морфологию поверхности плёнки (рис. 6а). Повышение W до 1.2 Дж/см^2 приводит к значительному росту интенсивности дифракционных пиков Ge (рис. 5), что характеризует поликристаллическую структуру слоя. В этом случае сплошная плёнка трансформируется в островковую, состоящую из крупных (200–500 нм) и мелких (20–60 нм) образований. Такая морфология плёнки связана с перегревом расплава, его разрывом на отдельные фрагменты при несмачивании подложкой. Это коррелирует с осциллограммой отражения $R(t)$ на рис. 3а. При этом в спектре РДСЛ видно появление пика тетрагонального GeO_2, что свидетельствует о некотором окислении островков Ge.

ИЛО толстой плёнки (d_2 = 300 нм) с $W = 0.8$ Дж/см^2, при котором фронт расплава не достигал границы раздела с подложкой, также приводил к образованию поликристаллической плёнки. В отличие от ИЛО, ИИО толстой плёнки приводил к формированию эпитаксиальных слоёв Ge:Sb (не показано), что связано с большой глубиной расплава (рис. 2а), значительно превышающей исходную толщину аморфной плёнки. Особенностью ионных пучков является объёмное поглощение энергии, что не приводит к высоким температурным градиентам и к отслаиванию расплавленных плёнок.

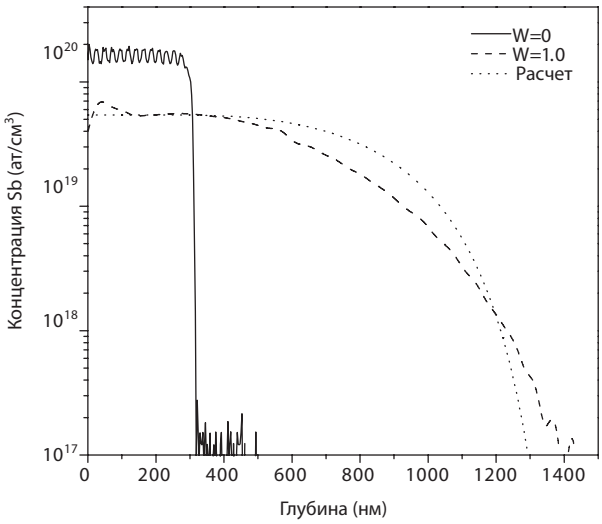


Рис. 4. Глубинные профили атомов Sb в Ge до ИИО ($W = 0$) и после ИИО ($W = 1.0$ Дж/см^2), полученные методом ВИМС. Также приведён расчётный профиль Sb после ИИО, полученный при задании коэффициента диффузии $D = 2 \cdot 10^{-3}$ см^2/с.

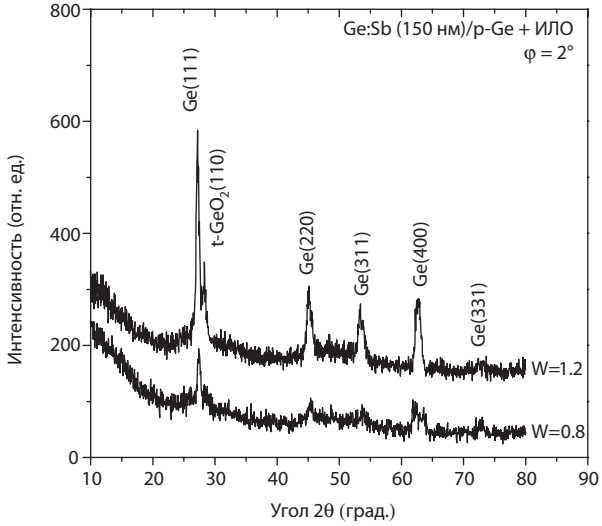


Рис. 5. Спектры РДСЛ (угол падения φ = 20°) осаждённой плёнки Ge:Sb толщиной d_1 = 150 нм после ИЛО с $W = 0.8$ и 1.2 Дж/см^2. Спектры смещены по вертикали для наглядности отображения.

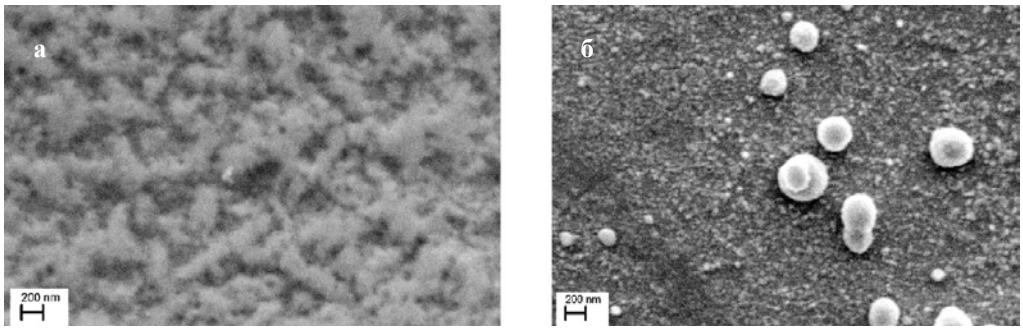


Рис. 6. СЭМ изображение поверхности осаждённой плёнки Ge:Sb толщиной d_1 = 150 нм после ИЛО с W = 0.8 Дж/см^2 (**а**) и W = 1.2 Дж/см^2 (**б**).

Заключение

В работе проведено экспериментальное и теоретическое рассмотрение воздействия наносекундными импульсными лазерными или ионными пучками на вакуумно-осаждёные слои Ge с высокой концентрацией донорной примеси Sb. Проведено компьютерное моделирование теплового воздействия и фазовых переходов, приводящих к трансформации аморфных слоёв Ge в расплав с последующей кристаллизацией. На основе полученных расчётных данных по глубине расплава и температуре в плёнках проведено моделирование диффузии примеси Sb в расплаве Ge, которое сравнивалось в экспериментальными профилями. Показано, что при достижении высоких температур расплава Ge коэффициент диффузии Sb может достигать повышенных значений ($D \sim 2 \cdot 10^{-3}$ см^2/с). Установлены режимы осаждения и отжига, при которых формируются эпитаксиальные слои Ge:Sb на подложке Ge. Исследования электрофизических параметров полученных слоёв являются предметом последующих публикаций.

Благодарности

Работа была выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-52-000-21_Бел_а и гранта БРФФИ № Ф16Р-069. Эксперименты с лазерным отжигом и динамикой отражения были проведены Ивлевым Г.Д. (БГУ, Минск). ВИМС-измерения были проведены на оборудовании Центра коллективного пользования “Диагностика микро- и наноструктур” Ярославского филиала ФГБУН Физико-технологический институт РАН Симакиным С.Г.

Литература

1. Pillarisetty R.: Nature **479**, 324–328 (2011)
2. Baldassarre L., Sakat E., Frigerio J., Samarelli A., Gallacher K., Calandrini E., Isella G., Paul D.J., Ortolani M., Biagioni P.: Nano Lett. **15**, 7225−7231 (2015)
3. Liu J., Kimerling L.C., Michel J.: Semicond. Sci. Technol. **27**, 094006(1–13) (2012)
4. Nam D., Sukhdeo D., Roy A., Balram K., Cheng S.-L., Huang K. C.-Y., Yuan Z., Brongersma M., Nishi Y., Miller D., Saraswat K.: Opt. Expr. **19**, 25866–25872 (2011)
5. Oehme M., Werner J., Kasper E.: J. Cryst. Growth **310**, 4531–4534 (2008)
6. Kim J., Bedell S.W., Sadana D.K.: ECS Trans. **33**, 201–204 (2010)
7. Bruno E., Scapellato G.G., Bisognin G., Carria E., Romano L., Carnera A., Priolo F.: J. Appl. Phys. **108**, 124902(1–6) (2010)
8. Batalov R.I., Bayazitov R.M., Faizrakhmanov I.A., Lyadov N.M., Shustov V.A., Ivlev G.D.: J. Phys. D: Appl. Phys. **49**, 395102(1–7) (2016)
9. Bayazitov R.M., Zakirzyanova L.Kh., Khaibullin I.B., I.F. Isakov, Chachakov A.F.: Vacuum **43**, 619–622 (1992)
10. Bayazitov R.M., Zakirzyanova L.Kh., Khaibullin I.B., G.E. Remnev.: Nucl. Instum. Meth. Phys. Res. B **122**, 35–38 (1997)
11. Новиков Г.А., Баталов Р.И., Баязитов Р.М., Файзрахманов И.А., Ивлев Г.Д., Прокопьев С.Л.: ЖТФ **85**, 89–95 (2015)
12. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твёрдых тел. М.: Наука 1964. 488 с.
13. Szyszko W., Vega F., Afonso C.N.: Appl. Phys. A **61**, 141–147 (1995)
14. Новиков Г.А., Баталов Р.И., Баязитов Р.М., Файзрахманов И.А., Лядов Н.М., Шустов В.А., Галкин К.Н., Галкин Н.Г., Чернев И.М., Ивлев Г.Д., Прокопьев С.Л., Гайдук П.И.: ФТП **49**, 746–752 (2015)

Влияние импульсного лазерного отжига на структурные, оптические и фотоэлектрические свойства композитных слоёв Si и GeSi с наночастицами Ag, полученных ионной имплантацией

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

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

В работе рассмотрено воздействие наносекундных лазерных импульсов на длине волны λ = 0.694 мкм на слои p-Si и GeSi, имплантированные высокой дозой ионов Ag^+. С целью создания сплава GeSi проводилась имплантация ионов Ge^+, а для формирования наночастиц Ag в Si и GeSi слоях – внедрение ионов Ag^+. Установлено, что в результате имплантации ионов Ag^+ поверхность Si и GeSi становится пористой с глубиной пор до 40 нм, в стенках которых зарождаются наночастицы Ag. После лазерной обработки наносекундным импульсом, приводящей к плавлению имплантированных слоёв, структура слоя Ag:Si становится поликристаллической и мелкозернистой. При этом в глубинном профиле Ag наблюдаются два максимума концентрации, характеризующих повторное зарождение на этих глубинах наночастиц Ag с оксидной оболочкой (Ag_2O). Темновые вольт-амперные характеристики перехода между слоем Ag:Si и подложкой p-Si показали формирование диода в результате ИЛО. Измерения фотопроводимости на сформированных образцах показали наличие фотоотклика в области длин волн 500–1200 нм.

Введение

Комбинирование Si структур с осаждёнными или внедрёнными металлическими наночастицами (Ag, Au), проявляющими локализованный поверхностный плазмонный резонанс (ППР) [1], является одним из подходов к улучшению чувствительности фотоприёмников и повышению эффективности преобразования световой энергии в электрическую в солнечных элементах. В зависимости от размеров металлических наночастиц данный эффект приводит либо к усилению ППР поглощения света (5–50 нм), либо к увеличению его рассеяния (50–150 нм) [1]. Для подобных структур наблюдается повышенная генерация фототока [2–4], в т.ч. в области прозрачности Si (λ > 1.2 мкм) за счёт инжекции электронов из металлических наночастиц в полупроводниковую матрицу через барьер Шоттки на границе их раздела [5, 6].

Формирование заглублённых под поверхностью матрицы плазмонных наночастиц представляет особый интерес в сравнении с осаждёнными на поверхности, поскольку в этом случае увеличивается площадь контакта наночастиц с матрицей, что способствует большей эффективности инжекции носителей. Также появляется возможность избежать их окисления, которое модифицирует спектральный характер ППР [7]. Одним из методов создания наночастиц определённых размеров и на заданной глубине является высокодозная ионная имплантация, которая в отдельных случаях может сочетаться с последующим термическим отжигом. Такая термическая обработка может способствовать устранению структурных дефектов облучаемой матрицы, созданных имплантацией, а также зарождению и росту металлических наночастиц. Ранее формирование наночастиц Ag в Si проводилось методом ионной имплантации [8], в т.ч. с последующим термическим отжигом при $T > 400$ °C [9, 10]. Однако было установлено, что такой отжиг приводит к потере примеси Ag из имплантированного слоя в результате испарения или диффузии вглубь кристалла [9].

В работе [11] впервые было предложено использовать импульсный лазерный отжиг (ИЛО) слоёв Si с наночастицами Ag (Ag:Si), синтезированных при ионной имплантации, с целью обеспечения быстрой кристаллизации аморфизованного слоя матрицы Si [11]. Было установлено, что в зависимости от плотности энергии лазерных импульсов (W = 1.2–1.8 Дж/см^2), в результате плавления и затвердевания расплава Ag:Si в кристаллической матрице Si повторно формировались наночастицы Ag различных размеров (5–50 нм) с характерной полосой ППР на длине волны ~830 нм.

Наряду с композитными слоями Ag:Si, для микро- и оптоэлектронных приложений представляет интерес создание композитных слоёв на основе сплава GeSi (Ag:GeSi), поскольку сплав GeSi характеризуется более узкой запрещённой зоной (E_g = 0.7–1.1 эВ в зависимости от содержания Ge) и высокой подвижностью носителей в сравнении с Si [12]. Эти факторы способствуют более широкому спектру поглощения света (λ = 0.3–1.8 мкм) и большему быстродействию электронных устройств на их основе. Создания сплавов GeSi заданного состава может быть проведено с использованием имплантация ионов Ge^+ в Si [13]. Ранее в работе [14] исследовалась возможность формирования наночастиц Ag в сплаве GeSi

путём последовательной имплантации Si ионами Ge^+ и Ag^+. На настоящем этапе поставлена задача по изучению влияния ИЛО на структуру и фотоэлектрические свойства данных композиционных материалов.

Эксперимент

В качестве подложек использовались полированные пластины монокристалла c-Si p-типа проводимости с ориентацией (111) и удельным сопротивлением 20 Ом·см, толщиной 400 мкм. Имплантация ионами Ge^+ и Ag^+ проводилась на ионном ускорителе ИЛУ-3 при вакууме 10^{-5} Торр с водяным охлаждением облучаемой мишени с образцами. Для получения образцов Ag:Si в подложку c-Si внедрялись ионы Ag^+ с энергией E = 30 кэВ, дозой $D = 1.44 \cdot 10^{17}$ ион/см^2 при плотности ионного тока J = 5 мкА/см^2. Для получения образцов Ag:GeSi подложка c-Si была первоначально имплантирована ионами Ge^+ с E = 40 кэВ, $D = 1 \cdot 10^{17}$ ион/см^2 при J = 5 мкА/см^2 и далее в слой Ge:Si внедрялись ионы Ag^+ в таком же, указанном выше режиме.

Для кристаллизации аморфизованных имплантацией слоёв Ag:Si и Ag:GeSi применялся ИЛО излучением рубинового лазера (λ = 0.694 мкм) на воздухе однократным импульсом длительностью τ_p = 80 нс. Плотности энергии в лазерном импульсе W были выбраны равными 1.2, 1.5 и 1.8 Дж/см^2 путём ослабления максимальной W = 2.5 Дж/см^2 нейтральными фильтрами. Диаметр пятна на образце составлял 4 мм, а неоднородность распределения энергии по площади пятна была не выше ±5%.

Изучение морфологии поверхности имплантированных образцов до и после ИЛО проводилось на атомно-силовом микроскопе (АСМ) Solver P47 (NT-MDT). Кристаллическая структура и фазовый состав образцов до и после ИЛО исследовалась методом рентгеновской дифракции в скользящих лучах (РДСЛ) при угле падения рентгеновского пучка φ = 1–3° на длине волны λ = 1.54 Å (CuKα).

Глубинное распределение атомов Ag и в имплантированном слое Ag:Si до и после ИЛО исследовалось методом время-пролетной вторичной ионной масс-спектрометрии (ВИМС) на установке TOF.SIMS5 (IONTOF), находящейся в ЦКП “Диагностика микро- и наноструктур” Ярославского филиала ФТИ РАН. Уровень вакуума в камере в процессе измерений составлял 10^{-10} Торр. Послойный анализ образцов проводился путём зондирования поверхности субнаносекундным пучком ионов Bi^+ (25 кэВ, 0.3 пА), а её травление – микросекундным пучком ионов Cs^+ (1 кэВ, 75 нА). Данная последовательность повторяется с частотой 2÷50 кГц, что соответствует длительности цикла 20÷100 мкс. Глубина кратера травления измерялась механическим профилометром Talystep (Taylor-Hobson). Измеренная величина полной глубины кратера использовалась для перевода шкалы времени профиля послойного анализа в шкалу глубин в предположении, что скорость распыления оставалась неизменной на протяжении всего цикла травления. Перевод шкалы

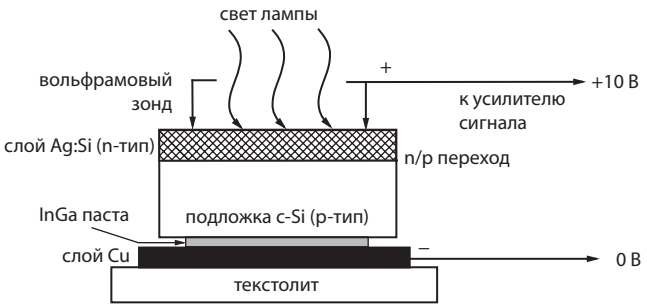


Рис. 1. Схематическое изображение измерения ФП на диодной структуре n-Ag:Si/p-Si.

ионного тока распыляемых вторичных ионов в шкалу концентрации примеси был проведён путём деления тока примесного иона всех изотопов данного элемента на ток ионов матрицы (Si) и умножением данного отношения на коэффициент относительной чувствительности элемента в Si. Сам коэффициент вычислялся на основании измерения соответствующего стандартного образца, полученного низкодозной имплантацией (Si ← Ag^+, E = 30 кэВ, $D = 10^{14}$ ион/см^2) в предположении отсутствия распыления Ag.

Электрические и фотоэлектрические свойства полученных образцов исследовались при комнатной температуре (300 К) путём измерения вольтамперных характеристик (ВАХ) и фотопроводимости (ФП) в поперечном направлении от слоя Ag:Si к подложке p-Si в темноте и при освещении лампой накаливания мощностью 150 Вт. При измерениях ФП образец располагался у выходной щели монохроматора МДР-206 и освещался сфокусированным в пятно диаметром 4 мм светом лампы накаливания, мощность которого на образце составляла ~1 мВт/см^2 в зависимости от длины волны (λ = 0.4–1.2 мкм). Сфокусированный свет лампы накаливания освещал входную щель монохроматора и прерывался модулятором с частотой 500 Гц. Схема поперечной структуры образца Ag:Si/p-Si при измерениях ФП приведена на рис. 1. Электрический контакт к отожжённому лазером участку образца Ag:Si (пятно диаметром 4 мм) осуществлялся парой заострённых вольфрамовых зондов. Для формирования омического контакта к подложке p-Si на неё наносилась InGa паста. Измерения ФП проводились в фотодиодном режиме с подачей на образец обратного напряжения U = 10 В и сравнивались в данными при U = 0. Измеряемый сигнал напряжения (фото-эдс) для различных длин волн света первоначально поступал на быстродействующий малошумящий усилитель сигналов AMP-PLN05 (CPTA). Далее усиленный сигнал вместе с электрическим сигналом от модулятора поступали на плату синхронного детектирования SDM (LED Microsensor NT). С платы SDM сигнал поступал на 24-разрядный аналого-цифровой преобразователь (АЦП), после чего обрабатывался на компьютере. Результирующий спектр ФП получался путём вычитания спектра темнового сигнала из спектра, полученного при освещении образца.

Результаты и обсуждение

Рассмотрим влияние высокодозной имплантации ионов Ag^+ и последующего ИЛО на изменение морфологии поверхности слоя Ag:Si. На рис. 2 приведены АСМ изображения имплантированного слоя до и после ИЛО, а также соответствующие им профили поверхности. Ионная имплантация приводит к образованию развитого рельефа поверхности, состоящего из углублений (пор) с поперечными размерами 100–200 нм, глубиной до 40 нм и толщиной стенок до 100 нм (рис. 2а–в). Величина среднеквадратичной шероховатости σ имплантированной поверхности составляет 9 нм. При этом можно видеть, что в стенках пор присутствуют наночастицы размером 40–70 нм. Такая картина поверхности соответствует ранее наблюдавшейся [8, 14], а исследования элементного состава на СЭМ свидетельствуют о формировании наночастиц Ag.

ИЛО, проводимый с W = 1.2 Дж/см^2 и сопровождающийся частичным плавлением имплантированного слоя [11], сохранял пористую структуру поверхности, сглаживая её рельеф до уровня σ = 3.5 нм (не показано). При повышении W до 1.5 Дж/см^2, когда фронт плавления распространялся глубже в слой Ag:Si [11], структура по-

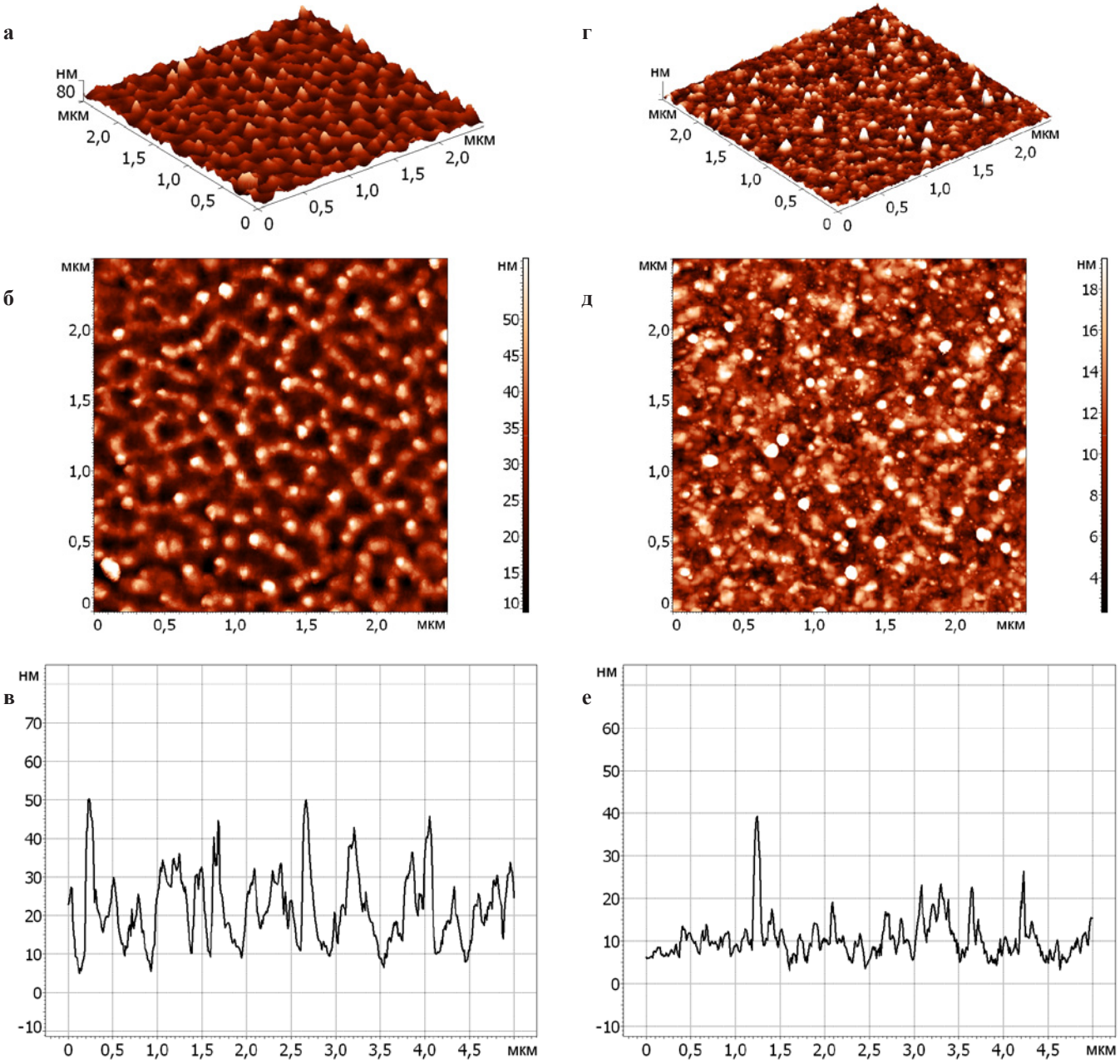


Рис. 2. АСМ изображения поверхности имплантированного слоя Ag:Si (**а**, **б**) и после проведения ИЛО с W = 1.5 Дж/см^2 (**г**, **д**), а также соответствующие им профили поверхности (**в**, **е**). Величина среднеквадратичной шероховатости σ = 9 нм (до ИЛО) и 4 нм (после ИЛО). Размер поля сканирования – 2.5×2.5 мкм, длина профиля сканирования – 5 мкм.

верхности становилась мелкозернистой (размеры зёрен 10–100 нм) и более однородной, с идентичным уровнем шероховатости (σ = 4 нм) (рис. 2г–е). Очевидно, что в данном случае большая глубина проникновения расплава (~100 нм) привела к исчезновению первоначальной пористой структуры слоя с образованием плотного массива наночастиц Ag и Si. ИЛО с максимальной плотностью энергии (W = 1.8 Дж/см^2) не показал существенного изменения морфологии в сравнении с предыдущим случаем (W = 1.5 Дж/см^2).

На рис. 3 приведены глубинные профили концентрации атомов Ag и O в имплантированном слое Si до и после ИЛО (W = 1.5 Дж/см^2), полученные методом ВИМС. Наряду с O в слое присутствовала примесь C, однако её концентрация была более чем на порядок величины ниже чем O. Профиль Ag в имплантированном образце (W = 0) показывает, что максимальная концентрация атомов Ag сосредоточена вблизи поверхности с пиком на глубине 5 нм, и характеризуется величиной $N_{Ag} \sim 4 \cdot 10^{22}$ ат/см^3, что соответствует 80% относительно атомарной концентрации Si ($N_{Si} = 5 \cdot 10^{22}$ ат/см^3). При этом профиль Ag в линейном масштабе концентрации выходит на концентрацию, близкую к нулевой, на глубине ~40 нм. Из рис. 2 также видно, что профиль атомов O почти повторяет профиль атомов Ag вблизи поверхности. При этом ширина профиля O на половине его высоты (~20 нм) меньше ширины профиля Ag (~40 нм). Пористая структура поверхности имплантированного слоя Ag:Si (рис. 2) может являться причиной высокого содержания кислорода в слое из-за его адсорбция из атмосферы при выдержке образцов на воздухе.

Концентрационный профиль Ag в образце, подвергнутом ИЛО (W = 1.5 Дж/см^2), состоит из двух пиков: первый узкий пик – вблизи самой поверхности с максимальной концентрацией (~$3.6 \cdot 10^{22}$ ат/см^3), второй широкий пик – на глубине около 60 нм с величиной на порядок меньшей (~$3.4 \cdot 10^{21}$ ат/см^3). Известно, что примесь Ag характеризуется низкой растворимостью в Si (~10^{16} ат/см^3) [15], а диффузия большинства примесей в расплаве Si (коэффициент диффузии $D \sim 10^{-4}$ см^2/с) существенно выше, чем в твёрдой фазе [16]. На основании этого можно предполагать, что первый пик в профиле Ag связан с эффектом вытеснения малорастворимой примеси к поверхности фронтом кристаллизации (сегрегация) [16], а второй – с диффузией примеси Ag в расплаве и её накоплением вблизи максимальной глубины расплава, как это наблюдалось ранее для бора в Si при ИЛО [17]. Интегрирование площадей под кривыми профилей Ag показало, что общая концентрация Ag после ИЛО уменьшается на 25% вследствие его испарения из образца.

Глубинный профиль O в имплантированном образце после ИЛО схож с профилем Ag, превышая его по величине концентрации по всей глубине. Виден интенсивный узкий пик кислорода вблизи поверхности, связанный с его сегрегацией и/или окислением поверхности образца (например, образование плёнки SiO_2), а также глубинный пик, совпадающий по положению с пиком Ag, указывающий на глубинную диффузию O и возможное окисление Ag в глубине Si. Данные метода РДСЛ свидетельствуют о формировании в результате ионной имплантации аморфизованного Si, содержащего кристаллические включения Ag и оксида серебра Ag_2O (рис. 4). Воздействие на слой Ag:Si лазерного импульса с W = 1.5 Дж/см^2 привело к образованию поликристаллического Si при некотором уменьшении интенсивности пиков, соответствующих фазам Ag и Ag_2O.

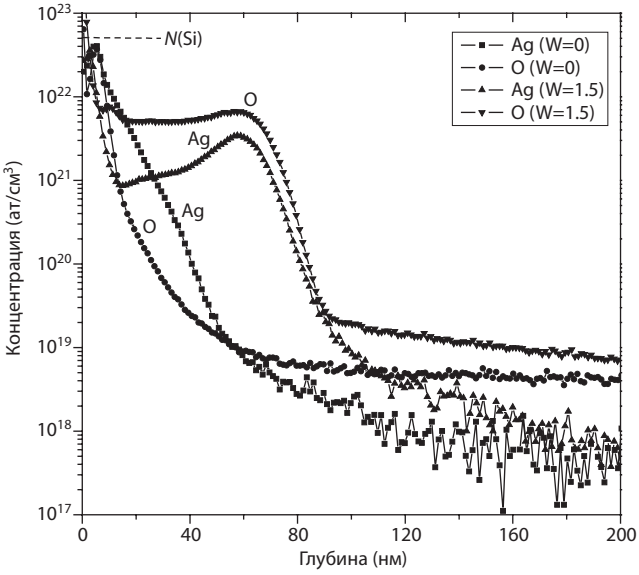


Рис. 3. Глубинное распределение атомов Ag и O в имплантированном слое Ag:Si (E = 30 кэВ, $D = 1.44 \cdot 10^{17}$ ион/см^2) до ИЛО (W = 0) и после ИЛО (W = 1.5 Дж/см^2), полученное методом ВИМС. Штриховая линия – атомарная концентрация Si, равная $5 \cdot 10^{22}$ ат/см^3.

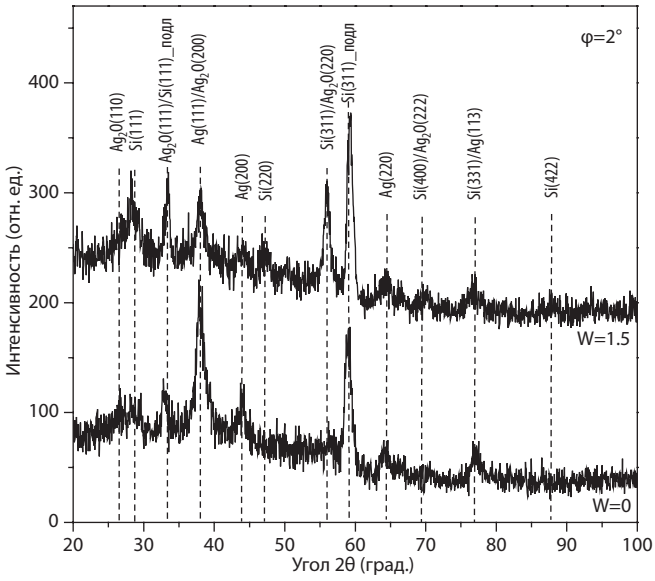


Рис. 4. Спектры РДСЛ имплантированного слоя Ag:Si (E = 30 кэВ, $D = 1.44 \cdot 10^{17}$ ион/см^2) до ИЛО (W = 0) и после ИЛО (W = 1.5 Дж/см^2), снятые при угле падения пучка φ = 2°.

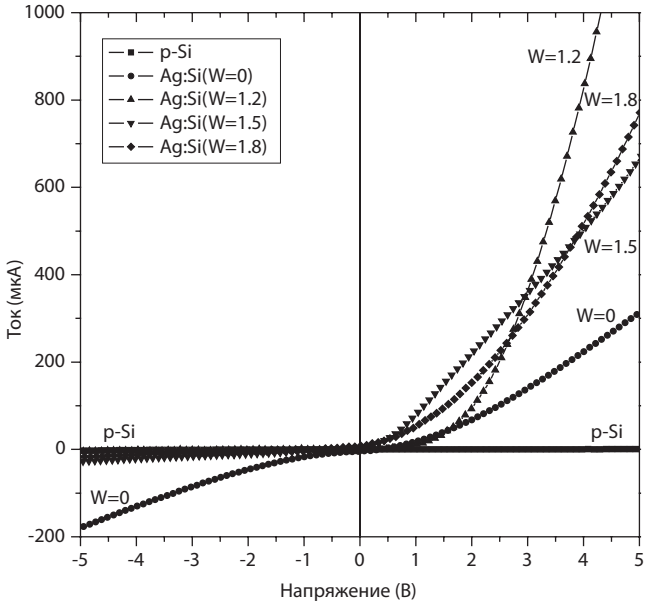


Рис. 5. Темновые ВАХ исходной подложки p-Si, имплантированного слоя Ag:Si (E = 30 кэВ, D = 1.44·10^{17} ион/см^2) до ИЛО (W = 0) и после ИЛО (W = 1.2, 1.5 и 1.8 Дж/см^2).

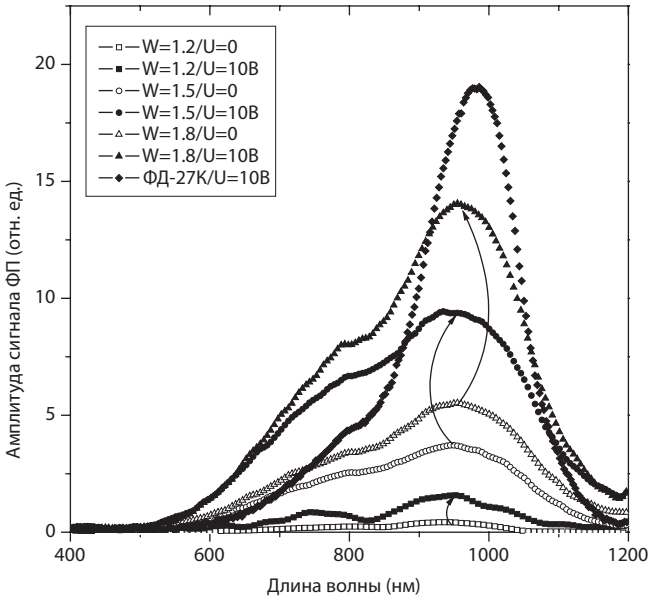


Рис. 6. Спектры ФП, измеренные на структурах n-Ag:Si/p-Si, полученных имплантацией ионов Ag^+ (E = 30 кэВ, D = 1.44·10^{17} ион/см^2) и ИЛО (W = 1.2–1.8 Дж/см^2) без подачи обратного смещения (U = 0) и с подачей смещения (U = 10 В). Также показан спектр ФП на стандартном фотодиоде ФД-27К. Стрелки указывают на рост сигнала для каждого образца при подаче смещения.

Измерение темновой ВАХ исходной подложки p-Si (рис. 5) показало практически нулевой ток во всём диапазоне приложенных напряжений (±5 В). ВАХ имплантированного образца Ag:Si/p-Si (без ИЛО, W = 0) показала идентичный рост тока при приложении прямого и обратного напряжений (симметричные ветви ВАХ), т.е. переход слой/подложка демонстрирует двухстороннюю проводимость. В тоже время после ИЛО ($W \geq$ 1.2 Дж/см^2) ВАХ показывает на значительное преобладание тока в прямой ветви над током в обратной ветви, что означает формирование n-p перехода (диода). Измерения типа проводимости слоя Ag:Si методом термо-ЭДС подтвердили образование n-типа в слое после ИЛО. Следует отметить, что с ростом W от 1.2 до 1.8 Дж/см^2 резкий рост тока начинается при меньших значений напряжения (~0.8 В и ~0.4 В, соответственно), что связано с улучшением структуры слоя Ag:Si, а именно с восстановлением кристаллической решётки Si и понижением дефектности в слое. Механизм возникновения электронной проводимости в отожжённом лазером слое Ag:Si в темновых условиях может быть связан с инжекцией электронов в кристаллическую матрицу p-Si из наночастиц Ag, образующих барьер Шоттки с окружающей их Si матрицей [6]. При этом стоит учитывать, что на границе раздела Ag/Si может присутствовать оксидная прослойка в виде Ag_2O, наличие которой наблюдалось методами ВИМС и РДСЛ (рис. 3 и 4). Эта прослойка может модифицировать высоту барьера Шоттки, значение которого, согласно разнице работ выхода Ag (4.52–4.74 эВ) и Si (4.6 эВ)[18], составляет около 0.1 эВ. Для возникновения проводимости n-типа в слое Ag:Si концентрация инжектируемых в матрицу p-Si электронов должна превышать концентрацию дырок в подложке, обусловленных примесью бора (B). Поскольку внедрённая концентрация примеси Ag (>10^{22} ат/см^3) значительно превосходит концентрацию B (~10^{15} см$^{-3}$), то, очевидно, что такой механизм вполне возможен.

На рис. 6 приведены спектры ФП, измеренные на сформированных диодных структурах n-Ag:Si/p-Si, как без подачи на них обратного смещения (U = 0) и с подачей такового (U = 10 В). Известно, что подача обратного смещения на фотодиод приводит к росту ширины области p-n перехода, что повышает фоточувствительность прибора [19]. Видно, что ИЛО с W = 1.2 Дж/см^2 (при U = 0) приводит к появлению слабого сигнала ФП в области 600–1050 нм с максимумом при ~930 нм. Спад сигнала для более длинных волн связан с уменьшением поглощения света кремнием при приближении к фундаментальному краю (E_g = 1.1 эВ). При подаче на структуру обратного смещения (U = 10 В) наблюдается рост амплитуды сигнала ФП во всём диапазоне длин волн. ИЛО с W = 1.5 Дж/см^2 (U = 0) приводит к возрастанию амплитуды сигнала ФП по отношению к образцу с меньшей W. Повышение сигнала вероятно связано с понижением аморфной фракции Si и дефектности в слое Ag:Si при данном режиме отжига, что также выражалось в более резком росте тока на ВАХ (рис. 5). Подача обратного смещения (U = 10 В) на такую диодную структуру сопровождалась дальнейшим ростом амплитуды сигнала ФП. Видно, что наибольшая интенсивность сигнала ФП соответствуют образцу с W = 1.8 Дж/см^2 (при U = 10 В). При этом интегральная амплитуда сигнала при подаче одинакового смещения вырастает на порядок величины в сравнении с образцом при W = 1.2 Дж/см^2, что связано

с качественным улучшением структуры слоя при полном плавлении аморфной области с последующей рекристаллизацией от ненарушенной Si подложки.

На рис. 6 также показан спектр ФП, измеренный на промышленном фотодиоде ФД-27К, при подаче аналогичного смещения (U = 10 В). Видно, что фотодиод показывает меньшую амплитуду сигнала для длин волн короче 900 нм и более высокую – вблизи фундаментального края Si в сравнении с наилучшим образцом Ag:Si. При этом сравнение интегрального сигнала (площади под спектрами) образца Ag:Si (W = 1.8 Дж/см^2, U = 10 В) и фотодиода показывает выигрыш образца на 15%. Таким образом, можно утверждать, что образец диодной структуры с наночастицами Ag обладает фоточувствительностью, сравнимой с промышленным изделием.

Что касается композитных слоёв Ag:GeSi, сформированных последовательной имплантацией ионов Ge^+ и Ag^+ и подвергнутых далее ИЛО (W = 1.2 и 1.5 Дж/см^2), то полученные результаты по морфологии их поверхности и фотопроводимости в значительной мере были схожи с вышеприведёнными данными для слоёв Ag:Si. Это связано с тем, что в процессе имплантации ионов Ag^+ в имплантированный слой Ge:Si происходило его интенсивное распыление, что привело к существенному (на порядок величины) понижению содержания атомов Ge в слое Si [14]. При этом оставшееся в образце количество Ge уже не оказывало существенного влияния на структуру и фотопроводимость полученных слоёв Ag:GeSi в сравнении со слоями Ag:Si. Поэтому требуется оптимизация процесса ионной имплантации для уменьшения подобного эффекта.

Заключение

Изучено влияние наносекундного лазерного отжига (λ = 0.694 мкм) на имплантированные ионами Ag^+ и Ge^+ слои p-Si с целью формирования заглублённых наночастиц Ag, проявляющих плазмонный эффект. Установлено, что лазерный отжиг, сопровождающийся плавлением аморфизованного слоя Si, приводит к сглаживанию рельефа поверхности (уменьшение шероховатости с 9 до 3–4 нм) и к уменьшению размеров повторно сформированных при рекристаллизации расплава наночастиц Ag (10–100 нм). При этом наночастицы Ag зарождаются в слое толщиной до 100 нм, а их поверхность, вероятно, покрыта оксидной оболочкой (Ag_2O). Темновые ВАХ показали, что в образцах после ИЛО образуется n-p переход за счёт возникновения в слое Ag:Si электронного типа проводимости. Измерения ФП на диодной структуре n-Ag:Si/p-Si продемонстрировали, что максимальный фотоотклик наблюдается при плотности энергии ИЛО W = 1.8 Дж/см^2 и обратном напряжении U = 10 В. Результаты по структуре и ФП для слоёв Ag:GeSi идентичны слоям Ag:Si вследствие понижения содержания атомов Ge в слое при имплантации ионами Ag^+. Полученные результаты демонстрируют потенциал слоёв Si с наночастицами Ag для создания новых фотоприёмных устройств.

Благодарности

Работа была выполнена в рамках гранта РНФ №17-12-01176. Эксперименты по лазерному отжигу слоёв Ag:Si и Ag:GeSi были проведены Ивлевым Г.Д. (БГУ, Минск, Беларусь).

Литература

1. Garcia M.A. : J. Phys. D: Appl. Phys. **44**, 283001 (2011)
2. Stuart H.R., Hall D.G.: Appl. Phys. Lett. **73**, 3815 (1998)
3. Schaadt D.M., Feng B., Yu E.T.: Appl. Phys. Lett. **86**, 063106 (2005)
4. Dzhafarov T.D., Pashaev A.M., Tagiev B.G., Aslanov S.S., Ragimov S.H., Aliev A.A.: Adv. Nano Res. **3**, 133 (2015)
5. Moulin E.A., Paetzold U.W., Pieters B.E., Reetz W., Carius R.: J. Appl. Phys. **113**, 144501 (2013)
6. Knight M.W., Sobhani H., Nordlander P., Halas N.J.: Science **332**, 702 (2011)
7. Kuzma A., Weis M., Flickyngerova S., Jakabovic J., Satka A., Dobrocka E., Chlpik J., Cirak J., Donoval M., Telek P., Uherek F., Donoval D.: J. Appl. Phys. **112**, 103531 (2012)
8. Баталов Р.И., Валеев В.Ф., Нуждин В.И., Воробьев В.В., Осин Ю.Н., Лебедев Д.В., Бухараев А.А. , Степанов А.Л.: Изв. вузов: Матер. электр. техн. **17** (№ 4), 295–300 (2014)
9. Seo H.W., Chen Q.Y., Rusakova I.A., Zhang Z.H., Wijesundera D., Yeh S.W., Wang X.M., Tu L.W., Ho N.J., Wu Y.G., Zhang H.X., Chu W.K.: Nucl. Instrum. Meth. B **292**, 50 (2012)
10. Dhoubhadel M.S., Lakshantha W.J., Lightbourne S., D'Souza F., Rout B., McDaniel F.D.: AIP Conf. Proceed. **1671**, 020003 (2015)
11. Batalov R.I., Nuzhdin V.I., Valeev V.F., Vorobev V.V., Osin Yu.N., Ivlev G.D., Stepanov A.L.: J. Phys. D: Appl. Phys. **51**, 015109(5pp.) (2018)
12. Paul D.J.: Semicond. Sci. Technol. **19**, R75–R108 (2004)
13. Hemment P.L.F., Cristiano F., Nejim A., Lombardo S., Larssen K.K., Priolo F., Barklie R.C.: J. Cryst. Growth. **157**, 147–160 (1995)
14. Баталов Р.И., Воробьев В.В., Нуждин В.И., Валеев В.Ф., Баязитов Р.М., Лядов Н.М., Осин Ю.Н., Степанов А.Л.: ЖТФ **86**, 104–110 (2016)
15. Глазов В.М., Земсков В.С.: Физико-химические основы легирования полупроводников. М.: Наука 1967. 372 с.
16. Двуреченский А.В., Качурин Г.А., Нидаев Е.В., Смирнов Л.С.: Импульсный отжиг полупроводниковых материалов. М.: Наука 1982. 208 с.
17. Monakhov E.V., Svensson B.G., Linnarsson M.K., Magna A.La, Italia M., Privitera V., Fortunato G., Cuscuna M., Mariucci L.: Mater. Sci. Engin. B **124-125**, 228–231 (2005)
18. Lide D.R.: CRC Handbook of Chemistry and Physics, table 12-124, 2475 p. (2003-2004)
19. Несмелова И.М., Рагинов С.В., Иванов В.П.: Введение в оптоэлектронику. Казань: Отечество 2006. 279 с.

Исследования методом ФМР магнитной анизотропии плёнок, полученных при имплантации ионов Co^+ в Si

В. В. Чирков, Г. Г. Гумаров, В. Ю. Петухов, М. М. Бакиров, В. Ф. Валеев

Отдел радиационных воздействий на материалы, лаборатория радиационной химии и радиобиологии; отдел химической физики, лаборатория спиновой физики и спиновой химии; отдел когерентной и нелинейной оптики, группа нанооптики и наноплазмоники

При имплантации ионов Co^+ в пластины монокристаллического кремния во внешнем магнитном поле синтезированы тонкие ферромагнитные плёнки силицида кобальта, обладающие одноосной магнитной анизотропией. Проведены исследования синтезированных плёнок методом ферромагнитного резонанса (ФМР) в температурном диапазоне от 100 до 300 К. Ширина резонансной линии ФМР практически не зависит от температуры, что согласуется с моделью Райхера, описывающей магнитный резонанс одноосных магнитных частиц. Обнаружена линейная зависимость константы магнитной анизотропии от температуры. Такая зависимость может быть связана с различием коэффициентов теплового расширения подложки Si(111) и ионносинтезированных плёнок силицида кобальта. Формирование наведённой магнитной анизотропии в полученных плёнках связывается с направленным упорядочением пар атомов (модель Нееля-Танигучи).

Введение

Синтез силицидов в кремниевой матрице является способом получения различных материалов, широко используемых для решения задач микроэлектроники и фотоэлектроники [1]. Магнитные силициды могут быть использованы как материалы для создания приборов спиновой электроники [2]. В частности, внимание исследователей привлекает силицид кобальта Co_3Si, обладающий высокой коэрцитивностью [3]. Формирование ферромагнитных силицидов в кремнии возможно осуществлять методом ионно-лучевого синтеза (ИЛС) [4–6]. Так, методом ИЛС в магнитном поле были получены ферромагнитные плёнки в монокристаллическом кремнии, имплантированном ионами кобальта, обладающие одноосной магнитной анизотропией [7]. Одна из моделей объясняет наведённую магнитную анизотропию направленным упорядочением пар атомов (модель Нееля-Танигучи) [8]. Данная модель часто привлекается для объяснения природы наведённой анизотропии, однако, относительно мало внимания уделено исследованию температурной зависимости константы анизотропии. Характер температурной зависимости данной константы определяется симметрией кристаллической решётки. Например, величина константы одноосной анизотропии K_u для гексагонального (и, следовательно, низкосимметричного) Co составляет порядка 10^6 эрг/см^3 и, следовательно, намного больше, чем K_u для кубического Fe или Ni (10^4–10^5 эрг/см^3) [9]. Температурная зависимость данной константы обычно описывается в рамках модели Каллена-Каллена [10], которая предсказывает степенную зависимость приведённой намагниченности: $K_u(T) \sim M_s(T)^n$. В случае одноосной анизотропии показатель степени $n = 3$.

В данной работе проведены исследования температурной зависимости константы анизотропии тонких плёнок силицидов кобальта, ионносинтезированных во внешнем магнитном поле. Применен метод ферромагнитного резонанса (ФМР), который при определённых условиях в ходе одного эксперимента позволяет определять, как поле анизотропии H_a, так и намагниченность насыщения M_s, а, следовательно, и константу анизотропии K_u.

Эксперимент

Исходным материалом для ионно-лучевого синтеза служили монокристаллические пластины кремния типа КДБ-10 (111). Имплантацию ионов Co^+ с энергией 40 кэВ проводили на ускорителе ИЛУ-3 при плотности ионного тока 5 мкА/см^2. Были получены образцы с дозами от $2 \cdot 10^{17}$ см$^{-2}$ до $3 \cdot 10^{17}$ см$^{-2}$. В процессе облучения параллельно поверхности образцов прикладывалось магнитное поле с напряжённостью ~200 Э.

Локальные магнитные свойства образцов исследовали с помощью оригинального сканирующего магнитополяриметра [5], который позволяет наблюдать меридиональный и экваториальный эффекты Керра. Спектры ферромагнитного резонанса были записаны на спектрометре X-диапазона Bruker EMX plus в диапазоне температур от 100 до 300 К.

Результаты и обсуждение

Исследования магнитных свойств, проведённые методом магнитооптического эффекта Керра (МОЭК), показали, что для образцов, имплантированных с дозой больше, чем $2.4 \cdot 10^{17}$ см$^{-2}$, наблюдается ярко выраженная одноосная анизотропия (рис. 1). С увеличением дозы имплантации, а, следовательно, и концентрации атомов Co, поле анизотропии H_a данных пл`нок растёт (см. уравнение (1)). Кроме того, было показано, что повторная низкодозовая (10^{14} см$^{-2}$) имплантация во внешнем магнитном поле,

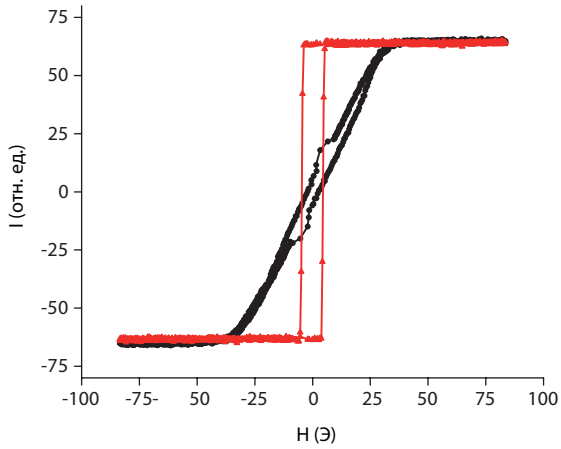


Рис. 1. Кривые намагничивания монокристаллического кремния, имплантированного ионами кобальта с дозой $3 \cdot 10^{17}$ ион/см^2 в магнитном поле $H \sim 200$ Э.

перпендикулярном направлению оси лёгкого намагничивания (ОЛН) в полученных плёнках, переключает направление ОЛН [11]. Такой малой дозы не достаточно для изменения формы магнитных частиц, но достаточно для сдвига всех атомов в имплантированном слое. На основе этих аргументов был сделан вывод о том, что формирование наведённой анизотропии обусловлено наличием упорядоченных пар атомов Co-Co (модель Нееля-Танигучи) [7].

В рамках модели Нееля-Танигучи константа анизотропии описывается формулой:

$$K_u = \frac{zNl_0\, l_0'}{15kT_a} C_B^2 , \qquad (1)$$

где z – число атомов, являющихся ближайшими соседями, N – полное число атомов в единице объёма, l_0, l_0' – коэффициенты дипольного взаимодействия, T_a – температура отжига, C_B – концентрация атомов, формирующих упорядоченные пары [6]. Константа магнитной анизотропии сильно зависит от температуры [12, 13]. В частности, теория Каллена-Каллена предсказывает, что константа магнитной анизотропии следуют простому степенному закону приведённой намагниченности: $K_u(T) \sim M_s(T)^n$. Между тем, данная зависимость не всегда выполняется. В работах [14, 15] наблюдалась зависимость $K_u(T) \sim 1/T$, и она было связана с анизотропией формы и разностью теплового расширения подложки и плёнки.

Для исследования температурной зависимости K_u тонких магнитных плёнок, имплантированных ионами кобальта, удобно использовать метод ФМР [16–18]. Выражение для определения резонансного поля ФМР:

$$\omega = \gamma[(H_{res} + 4\pi M_{eff} + \frac{2K_u}{M}\cos^2\theta) \times (H_{res} + \frac{2K_u}{M}\cos 2\theta)]^{1/2} , \qquad (2)$$

где ω – круговая частота магнитного поля, γ – гиромагнитное отношение, H_{res} – напряжённость внешнего статического магнитного поля, M_{eff} – эффективная намагниченность, M – намагниченность, K_u – константа одноосной анизотропии, θ – угол между направлениями одноосной анизотропии и внешнего статического поля H_{res}. Отметим, что в нашем случае $H_{res} \gg H_s$ (поле насыщения), поэтому $M = M_s$. Также $4\pi M_{eff} = 4\pi M - 2K_\perp/M$, но второй член можно не учитывать, когда толщина плёнки менее 20 монослоёв [19]. Тогда эффективная намагниченность $M_{eff} \approx M_s$. В случае, когда $\theta = 45°$, и учитывая, что поле анизотропии $H_a = 2K_u/M \ll H_{45}$, можно определить M_s.

$$M_s = \frac{1}{4\pi}\left(\frac{1}{H_{45}}\left(\frac{\omega}{\gamma}\right)^2 - H_{45}\right) . \qquad (3)$$

Записав уравнение (2) для направлений ОЛН и ОТН ($\theta = 0°$ и $\theta = 90°$) и учитывая, что в нашем случае $H_a \ll H_0$ и $H_a \ll H_{90}$ (где H_0 и H_{90} – это значения H_{res} для $\theta = 0°$ и $\theta = 90°$), можно получить выражение для определения поля анизотропии:

$$H_a = \frac{(H_{90} - H_0)}{2}\left(1 + \frac{H_0}{4\pi M_s}\right) . \qquad (4)$$

Исследования методом ФМР подтверждают наличие одноосной магнитной анизотропии в плоскости плёнки (рис. 2). Поле анизотропии при комнатной температуре для образца, имплантированного Co^+ с дозой $3 \cdot 10^{17}$ ион/см^2, оценённое по формуле (4), составляет $H_a \sim 20$ Э, что согласуется с данными МОЭК. Для тонких магнитных плёнок Co_2MnSi, подобных полученным плёнкам силицида кобальта, наблюдались близкие значения H_a [20]. Сигнал ФМР анизотропных плёнок демонстрирует типичную зависимость от угла между осью лёгкого намагничивания и постоянным магнитным полем спектрометра (рис. 2б) [21]. Как следует из теории ФМР в тонких плёнках, минимальное значение резонансного поля соответствует ОЛН, максимальное – ОТН.

На рис. 3 представлены спектры ФМР в диапазоне температур от 100 до 300 К для образца, имплантированного Co^+ с дозой $3 \cdot 10^{17}$ ион/см^2. Ширина линии ФМР составляет ~80 Э и практически не зависит от температуры

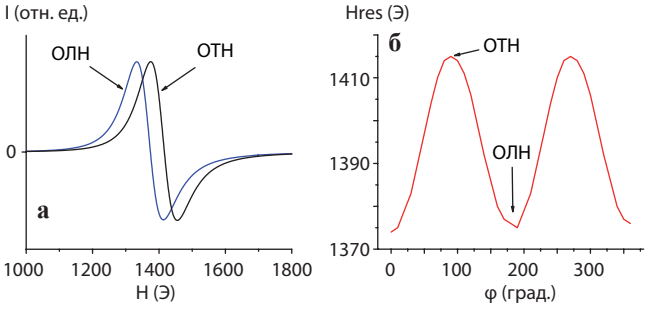


Рис. 2. а Спектры ФМР для образца кремния, имплантированного Co^+ в магнитном поле 200 Э при температуре 300 К с дозой $3 \cdot 10^{17}$ ион/см^2 в направлении ОЛН и направлении ОТН; **б** азимутальная зависимость резонансного поля ФМР в плоскости плёнки.

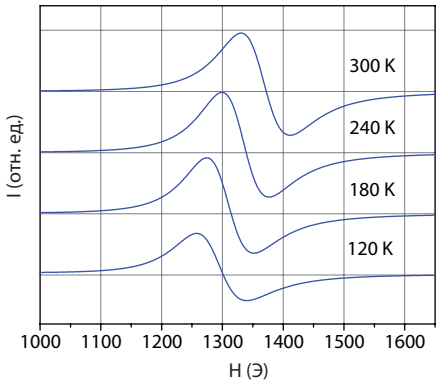


Рис. 3. Спектры ФМР для образца кремния, имплантированного Co^+ с дозой $3 \cdot 10^{17}$ ион/см^2, при различных температурах.

в исследуемом диапазоне. При этом H_{res} уменьшается с уменьшением температуры. Такую температурную зависимость можно объяснить в рамках модели магнитного резонанса в ансамбле однодоменных анизотропных частиц, предложенным Райхером и Степановым [22]. Малый разброс в направлениях осей анизотропии частиц приводит к малому вкладу в неоднородное уширение линии при относительно низких температурах.

Из результатов исследований методом ФМР были определены значения намагниченности насыщения M_s и поля анизотропии H_a в температурном диапазоне от 100 до 300 К для двух образцов, синтезированных с дозой $2.6 \cdot 10^{17}$ и $3 \cdot 10^{17}$ ион/см^2. На рис. 4а приведены температурные зависимости намагниченности насыщения. Намагниченность насыщения M_s возрастает с понижением температуры по степенному закону, в соответствии с законом Блоха, где $M_s(T) = M_s(0)(1 - BT^{3/2})$ для $T \ll T_c$ [23], что характерно и для тонких магнитных плёнок [24, 25]. Значение поля анизотропии H_a демонстрирует линейную зависимость от температуры (рис. 4б). Такая зависимость наблюдалась для тонких магнитных плёнок CoZrNb различной толщины, и было показано, что с ростом толщины плёнки значение поля анизотропии возрастает [26].

Используя значения M_s и H_a, можно рассчитать константу анизотропии K_u в температурном диапазоне от 100 до 300 К. Как видно из рис. 5а, для обеих доз имплантации зависимость константы анизотропии от температуры является линейной. Такие зависимости константы анизотропии наблюдаются в ряде работ [27–29]. При этом было обнаружено, что константа магнитной анизотропии $3 \cdot 10^{17}$ заметно возрастает при понижении температуры [30]. Интересно рассмотреть температурную зависимость $3 \cdot 10^{17}$ с точки зрения теории Каллена-Каллена [10], по которой согласно степенному закону зависимости между константой магнитной анизотропии $3 \cdot 10^{17}$ и намагниченностью насыщения $M_s(T)$ при низких температурах ($T \ll T_c$):

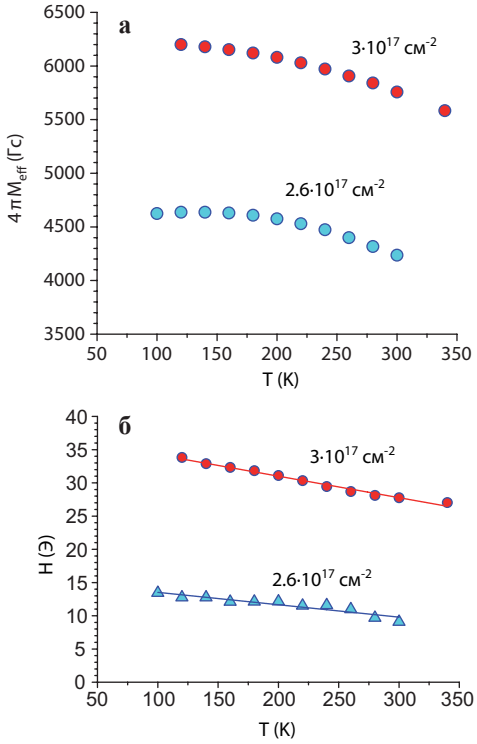
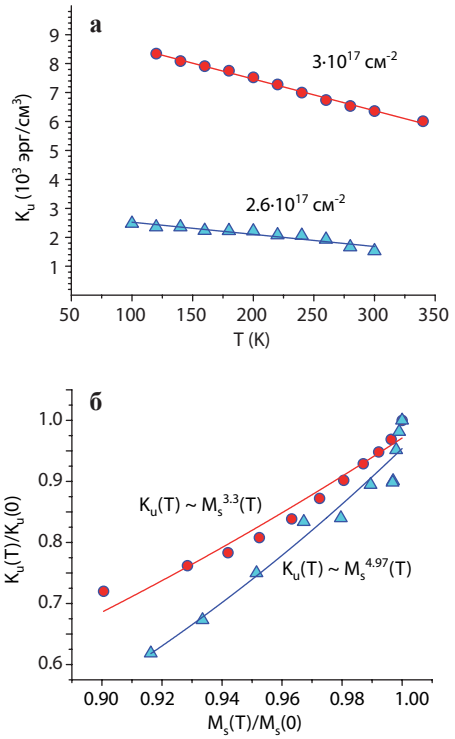


Рис. 4. а Температурная зависимость намагниченности насыщения; **б** температурная зависимость поля анизотропии тонких плёнок силицидов кобальта

$$\frac{K_u(T)}{K_u(0)} = \left[\frac{M_s(T)}{M_s(0)}\right]^n$$

для одноосных магнитных систем следует ожидать значение $n = 3$. В данном эксперименте для образца, имплантированного Co^+ с дозой $3 \cdot 10^{17}$ ион/см^2 $n = 3.3$, а для образца с дозой $2.6 \cdot 10^{17}$ ион/см^2 $n = 4.97$ (рис. 5б). Отклонение температурной зависимости константы одноосной анизотропии от степенного закона Каллена-Каллена наблюдалось во многих работах [31–33]. Такое поведение связывалось с взаимодействием между различными вкладами в температурную зависимость одноосной анизотропии. Отклонение может возникать из-за расширения тепловой решётки и/или анизотропии более высокого порядка [28]. Также важным фактом является то, что модель Каллена-Каллена не учитывает микроскопические вклады в анизотропию, такие как конечный размер и поверхностные эффекты, которые значительны в случае всё более мелких частиц. В целом поведение зависимости $K_u(T)$ противоречит степеному закону Каллена-Каллена для одноосной магнитной системы.

Необходимо отметить, что линейная зависимость плоскостной магнитной анизотропии от температуры также была обнаружена для ультратонких плёнок железа на GaAs подложках [27] и почти линейная температурная зависимость перпендикулярной одноосной анизотропии [28]. Было высказано также предположение [27], что такая зависимость для различных типов анизотропии и



.**Рис. 5. а** Температурная зависимость константы магнитной анизотропии; **б** константа анизотропии K_u (T), построенная как функция M_s (T).

различных объектов может иметь единое происхождение. В частности, такое поведение может быть связано с температурной зависимостью магнитоупругих параметров, т.к. напряжения между Fe(001) и GaAs(001) уменьшается на 40% в диапазоне от комнатной температуры до 4 К. Однако этому противоречит обнаруженная авторами линейная зависимость от температуры четырёхосной анизотропии, т.к. для этого типа анизотропии нет соответствующего магнитоупругого члена.

Подобная зависимость константы одноосной анизотропии в плоскости также наблюдалась на ультратонких слоях Fe, выращенных на Si(111) [14]. При этом зависимость константы анизотропии от температуры линейна лишь для плёнок толщиной 40 монослоёв, для более толстого слоя в 60 МС она подчиняется закону $1/T$. Предполагается, что такая анизотропия вызвана анизотропией формы, связанной с неровностями подложки. В этом случае корреляция температурного хода константы анизотропии с толщиной плёнки также может указывать на связь с различием коэффициентов теплового расширения подложки Si(111) и нанесённого слоя железа. Аналогично, линейная зависимость константы анизотропии от температуры в случае ионносинтезированных плёнок силицида кобальта в Si(111) также может быть связана с тепловым расширением.

Следует также отметить, что линейная зависимость константы анизотропии возможна лишь в области температур, достаточно далеких от точки Кюри, т.е. в области, в которой намагниченность насыщения слабо зависит от температуры. Другим условием является линейная зависимость поля анизотропии от температуры (рис. 4б).

Заключение

При имплантации ионов Co^+ в пластины монокристаллического кремния во внешнем магнитном поле были синтезированы тонкие ферромагнитные плёнки силицида кобальта, обладающие одноосной магнитной анизотропией. Формирование наведённой магнитной анизотропии в полученных плёнках связывается с направленным упорядочением пар атомов (модель Нееля-Танигучи). Ширина резонансной линии ФМР практически не меняется с понижением температуры, что согласуется с моделью Райхера, объясняющей такое поведение отсутствием разброса в направлениях осей анизотропии частиц. Обнаружена линейная зависимость константы магнитной анизотропии от температуры для синтезированных плёнок в температурном диапазоне от 100 до 300 К, которая не описывается моделью Каллена-Каллена. Такая зависимость может быть объяснена различием коэффициентов теплового расширения подложки Si(111) и ионносинтезированных плёнок силицида кобальта.

Литература

1. Zhang S.L., Ostling M.: Crit. Rev. Solid State Mater. Sci. **28**, 1 (2003)
2. Ionescu A., Vaz C.A.F., Trypiniotis T., Gurtler C.M., GarciaMiquel H., Bland J.A.C., Vickers M.E., Dalgliesh R.M., Langridge S., Bugoslavsky Y., Miyoshi Y., Cohen L.F., Ziebeck K.R.A.: Phys. Rev. B **71**, 094401 (2005)
3. Zhao X., Yu S., Wu S., Nguyen M.C., Wang C.-Z., Ho K.-M.: Phys. Rev. B **96**, 024422 (2017)
4. Petukhov V.Yu., Khaibullin I.B., Zaripov M.M., Groetzschel R., Voelskow M., Klabes R.: Physica Status Solidi A **96**, 463–468 (1986)
5. Gumarov G.G., Petukhov V.Yu., Zhikharev V.A., Valeev V.F., Khaibullin R.I.: Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B **267**, 1600–1603 (2009)
6. Gumarov G.G., Konovalov D.A., Alekseev A.V., Petukhov V.Yu., Zhikharev V.A., Nuzhdin V.I., Shustov V.A.: Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B **282**, 92–95 (2012)
7. Chirkov V.V., Gumarov G.G., Petukhov V.Yu., Denisov A.E.: J. Surf. Invest.: X-Ray, Synchrotron Neutron Tech. **2**, 61–65 (2018)
8. Chikazumi S.: Physics of Ferromagnetism. Oxford: Oxford University Press 1996. pp. 299–309.
9. Muller G.A., Carpene E., Gupta R., Schaaf P., Zhang K., Lieb K.P.: Eur. Phys. J. B **48**, 449–462 (2005)
10. Callen H.B., Callen E.: J. Phys. Chem. Solids **27**, 1271 (1966)
11. McCord J., Monch I., Fassbender J., Gerber A., Quandt E.: J. Phys. D: Appl. Phys. **42**, 055006 (2009)
12. Qiao Sh., Nie1 Sh., Zhao J., Zhang X.: J. Appl. Phys. **117**, 093904 (2015)
13. Vaz C.A.F., Bland J.A.C., Lauhoff G.: Rep. Prog. Phys. **71**, 056501 (2008)
14. Zhang Y.S., He W., Ye J., Hu B., Tang J., Zhang X.Q., Cheng Z.H.: Physica B **512**, 32–38 (2017)
15. Grimsditch M., Hoffmann A., Vavassori P., Shi H., Lederman D.: Phys. Rev. Lett. **90**, 257201 (2003)
16. Petukhov V.Yu., Khabibullina N.R., Ibragimova M.I., Bukharaev A.A., Biziaev D.A., Zheglov E.P., Gumarov G.G., Muller R.: Appl. Magn. Reson. **32**, 345–361 (2007)
17. Zakeri Kh., Kebe Th., Lindner J., Farle M.: J. Magn. Magn. Mater. **299**, 1–10 (2006)

18. Lenz K., Kosubek E., Baberschke K., Wende H., Herfort J., Schonherr H.P., Ploog K.H.: Phys. Rev. B **72**, 144411 (2005)
19. Belyaev B.A., Izotov A.V.: JETP Lett. **103**, 41–45 (2016)
20. Belmeguenai M., Zighem F., Faurie D., Tuzcuoglu H., Cherif S.M., Westerholt K., Seiler W., Moch P.: Physica Status Solidi A **209**, 1328–1333 (2012)
21. Alekseev A.V., Gumarov G.G., Bakirov M.M., Petukhov V.Yu., Nuzhdin V.I.: J. Surf. Invest.: X-Ray, Synchrotron Neutron Tech. **10**, 608–611 (2016)
22. Raikher Yu.L., Stepanov V.I.: Sov. Phys. JETP **75**, 764 (1992)
23. Krinchik G.S.: Physics of Magnetic Phenomena. Moscow: Moscow State University Press 1985. p. 107.
24. Gardelis S., Androulakis J., Giapintzakis J., Monnereau O., Buckle P.D.: Appl. Phys. Lett. **85**, 3178 (2004)
25. Sahu B.N., Doshi A.S., Prabhu R., Venkataramani N., Prasad S., Krishnan R.: AIP Advances **6**, 055928 (2016)
26. Katada H., Shimatsu T., Watanabe I., Muraoka H., Sugita Y., Nakamura Y.: IEEE Transactions on Magnetics **36**, 2905–2908 (2000)
27. Aktas B., Heinrich B., Woltersdorf G., Urban R., Tagirov L.R., Yldz F., Ozdoan K., Ozdemir M., Yalcin O., Rameev B.Z.: J. Appl. Phys. **102**, 013912 (2007)
28. Zakeri Kh., Kebe Th., Lindner J., Farle M.: Phys. Rev. B **73**, 052405 (2006)
29. Fu C.M., Kao P.C., Hsu H.S., Chao Y.C., Yu C.C., Huang J.C.A.: IEEE Transactions on Magnetics **38**, 2667–2669 (2002)
30. Yoon S.: Hyperfine Interact. **231**, 21–28 (2015)
31. Chatterjee B.K., Ghosh C.K., Chattopadhyay K.K.: J. Appl. Phys. **116**, 153904 (2014)
32. Wang J., Zhao F., Wu W., Zhao G.M.: J. Appl. Phys. **110**, 096107 (2011)
33. Long G., Zhang H.W., Li D., Sabirianov R., Zhang Z., Zeng H.: Appl. Phys. Lett. **99**, 202103 (2011)

АСПИРАНТЫ И МОЛОДЫЕ УЧЁНЫЕ

Аспирантура

В 2017 году в аспирантуру поступил 1 человек:

Загидуллин Рустем Рафисович
01.04.11 “Физика магнитных явлений”,
руководитель д.ф.-м.н. Мамин Р.Ф.

На 31.12.2017 число аспирантов института с очной формой обучения составило 11 человек (аспирантов заочного обучения, соискателей и докторантов нет).

Премии и награждения

– Акатьев Д.О., аспирант ФГОС/м.н.с., стал лауреатом стипендии КФТИ им. Б. М. Козырева среди молодых учёных 2017 года.
– Камашев А.А., н.с., стал лауреатом премии и награждён дипломом за 1-е место в городском конкурсе среди молодых учёных и специалистов на соискание казанской премии им. Е. К. Завойского в области физики.

Победители конкурса научных проектов, выполняемых молодыми учёными (“Мой первый грант”), проводимого РФФИ

1. Шмелёв А.Г., к.ф.-м.н.: Создание и исследование новых композитных материалов на основе нанокристаллитов халькогенидов кадмия для оптоэлектроники и фотоники (16-32-00397)
2. Леонтьев А.В., м.н.с.: Исследование динамики возбуждённых состояний ионов Ce^{3+} в кристаллах $LiY_xLu_{(1-x)}F_4$ (x = 0.1) для создания твёрдотельного генератора ультракоротких импульсов УФ диапазона спектра (16-32-00406)
3. Гаврилова Т.П., к.ф.-м.н.: Создание и исследование наногранулированных композитных материалов на основе $CaCu_3Ti_4O_{12}$ и гексаферрита стронция или лантан-стронциевых манганитов с необычными магнитоэлектрическими свойствами (16-32-00660)

Победитель инновационной образовательной программы “Участник молодёжного научно-инновационного конкурса” (“У.М.Н.И.К.”)

– Гарипов Р.Р., аспирант/м.н.с.: Разработка злектропроводящего композиционного материала на основе полимера и углеродных нанотрубок

Победители конкурса для молодых учёных и аспирантов “Гранты КФТИ”

– Гоенко И.А., м.н.с.: “Исследование конформации γ-облученного глюконата кальция методом ЭПР”
– Сахин В.О., аспирант ФГОС/м.н.с.: “Изучение топологических изоляторов с собственными магнитными моментами с помощью ЭПР”
– Павлов Д.П., м.н.с.: “Моделирование некоторых динамических режимов в ферромагнетиках-полупроводниках”

Победитель конкурса 2017 года на право получения грантов Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских учёных – кандидатов наук в области знания “Технические и инженерные науки”

– Кашапов Р.Н., к.т.н.: Исследование плазменных процессов получения металлических порошков, предназначенных для использования в технологии селективного лазерного сплавления

ПЕРСОНАЛИИ

Вадим Алексеевич Голенищев-Кутузов. К 85-летию со дня рождения

Вадим Алексеевич Голенищев-Кутузов

В 2017 году доктору физико-математических наук, профессору Вадиму Алексеевичу Голенищеву-Кутузову, которого знают и ценят в физтехе, исполнилось 85 лет. Его жизненный и научный путь неоднократно отражался в Ежегоднике (2002, 2007, 2012 гг.). Мы с радостью отмечаем, что годы не властны над Вадимом Алексеевичем, и желаем Вадиму Алексеевичу “так держать”.

В интервью, которое дал Вадим Алексеевич несколько лет назад Ежегоднику, он сказал, что главным стимулом его жизни является наука, а также отметил ностальгию по тем временам, когда он активно участвовал в научной и общественной жизни физтеха. В этом году мы попросили Вадима Алексеевича поделиться воспоминаниями о тех временах. Редакция Ежегодника бесконечно благодарна В. А. Голенищеву-Кутузову за огромную работу, которую он проделал, описав не только личные воспоминания, но жизнь физтеха в шестидесятые–семидесятые годы прошлого столетия.

Становление и развитие физических исследований в Казанском физико-техническом институте

Моё знакомство с физтехом, как Казанский физико-технический институт кратко звали сотрудники, началось в 1961 году, поскольку ещё с августа предыдущего года моим, пока негласным, руководителем стал Уно Херманович Копвиллем. Тот, 1960 год, был для меня, ассистента кафедры общей физики КГУ, весьма огорчительным, поскольку стала очевидной невозможность защиты практически выполненной мною диссертации по экспериментальному изучению процессов спин-спиновой и спин-решёточной релаксаций в хромокалиевых квасцах в частотных диапазонах 300–500 МГц и 10 ГГц. Моим руководителем по ней был К. П. Ситников – заведующий кафедрой общей физики, и моя работа, по существу, была продолжением его собственных исследований. Вследствие изложенных выше обстоятельств, я серьёзно задумался о прекращении фундаментальных исследований и уходе из КГУ с переходом в прикладную науку. Однако, после длительных раздумий, в августе 1960 года я обратился за советом к молодому кандидату наук Уно Хермановичу Копвиллему, работавшему тогда на кафедре Семёна Александровича Альтшулера в КГУ. Моя встреча с Уно Хермановичем была случайной – мы вместе принимали вступительные экзамены по физике. И он, с учётом уже выполненных мною экспериментальных разработок и релаксационных исследований, предложил продолжить их изучение, но уже при возбуждении спиновых систем с помощью ультразвука. Это предложение было связано с недавними теоретическими работами Н. Г. Колосковой, Б. И. Кочелаева и У. Х. Копвиллема по нерезонансному парамагнитному поглощению акустических волн. Идейным руководителем всех теоретических исследований по акустическому парамагнитному резонансу и релаксации

был С. А. Альтшулер, получивший впоследствии за предсказание этого эффекта мировое признание и Диплом СССР на открытие.

Если бы я в тот момент представлял себе все сложности подобных экспериментов, то наверняка отказался от этого предложения. Но, поскольку ранее я не сталкивался с ультразвуковыми исследованиями, то немедленно согласился.

Последующие два года я по-прежнему работал ассистентом КГУ, собрал свой первый акустомагнитный спектрометр на 10 МГЦ и начал эксперименты. Копвиллем, после своего перехода из КГУ в физтех (1961 г.), предложил мне поступить в аспирантуру, что затянулось до осени 1962 года. Однако, уже с лета 1961 года я стал регулярно посещать 43-ю комнату нового пристроя по ул. Лобачевского, где сидели все теоретики сектора теоретической физики: У. Х. Копвиллем, А. Р. Кессель, Б. М. Хабибуллин, Р. Х. Тимеров, А. Р. Мороча, В. Р. Нагибаров. В тот же год я более близко познакомился и с рядом экспериментаторов физтеха. Наиболее благожелательно ко мне отнёсся Нургаяз Салихович Гарифьянов, который впоследствии не раз выручал меня какими-либо приборами и полезными советами. Несколько недоверчиво наблюдали за мной Ю. В. Яблоков и И. А. Сафин – к тому времени уже опытные экспериментаторы, хорошо знавшие, как сложно создавать новые установки, да ещё при руководителе – "чужаке" в институте. Более негативно отнеслись А. И. Ривкинд и С. Г. Салихов, к тому времени – маститые специалисты по радиоспектроскопическим исследованиям, явно полагавшие, что очередная задумка теоретика Копвиллема руководить экспериментами окончится "пшиком". Тем не менее, осенью 1962 года я поступил в аспирантуру, и до настоящего времени считаю физтех своим домом: пишу совместные статьи со своими бывшими сотрудниками, ряд учёных состоят членами руководимого мною диссертационного совета в Энергоуниверситете. Поскольку до осени 1962 года я мало бывал в физтехе, то мой обзор основан на воспоминаниях очевидцев и участников. К сожалению, большинство из них уже ушло из земной жизни, а оставшихся моих коллег прошу быть снисходительными к моим воспоминаниям и извинить меня за возможные неточности и неверную оценку далёких событий.

Меня очень тронула просьба моего давнего коллеги и друга Виолеты Константиновны Воронковой написать обзор о становлении и развитии физических исследований в физтехе, и я не смог отказаться. Он не является достоверно хроникальным. Я изложил в нём своё видение развития исследований и сопутствующие обстоятельства, запомнившиеся мне. Я не стал повторять полную хронологию истории КФТИ, которая, на мой взгляд, вполне профессионально изложена Н. А. Карташёвой и опубликована в Ежегоднике КФТИ за 2006 год. При написании обзора я пользовался опубликованными воспоминаниями учёных, знакомых с главными особенностями научной среды того времени в Казани и бывших активными участниками описанных событий. Это – Г. П. Вишневская, Ю. В. Яблоков, Р. Ш. Нигматуллин, И. И. Силкин. Эти свидетельства опубликованы, в основном, в сборниках "Чародей эксперимента" (М.: Наука, 1994) и "Б. М. Козырев. Жизнь и творчество" (Казань, АНТ, 2005). Более того, я не стал касаться развития исследований по механике и математике в физтехе, поскольку не являюсь специалистом в этих направлениях.

Начало физических исследований в КФТИ

Казанский филиал АН СССР был открыт в апреле 1945 года постановлением Совета народных комиссаров СССР. Конечно, значительную роль в этом событии сыграло пребывание в Казани в годы Великой Отечественной войны значительного контингента учёных Академии наук СССР. В составе филиала на первом этапе были организованы институты: физико-технический; химический; геологический; биологический; языка, литературы и истории; сектор водохозяйственных проблем и энергетики. Первоначально структура ФТИ была утверждена в составе четырёх секторов: математики, астрономии и геофизики, физики, механики. Уже через год директором был утверждён профессор Хамид Музафарович Муштари. В своих воспоминаниях ученик Х. М. Муштари, член-корр. РАН М. А. Ильгамов пишет: "Институт начинался с двух комнат в геометрическом корпусе Казанского университета с несколькими столами и стульями. Пока не было достаточных помещений, многие сотрудники работали дома". И только через несколько месяцев филиал получил в своё распоряжение, отремонтированное после пребывания в нём госпиталя, трёхэтажное здание по ул. Лобачевского, к которому в 1957 году был сделан пристрой. Впоследствии он получил название "новое здание филиала".

Первым заведующим сектором физики в январе 1946 года стал будущий академик Евгений Константинович Завойский, а заведующим лабораторией магнитной спектроскопии, входящей в состав сектора физики – Борис Михайлович Козырев.

Поскольку, как считают сами экспериментаторы, работа любого научного учреждения начинается с момента начала проведения экспериментов, то мне хотелось бы, как экспериментатору, тоже оценить вклад Е. К. Завойского в развитие радиоспектроскопических исследований в физтехе. Как известно, Е. К. Завойский защитил докторскую диссертацию в январе 1945 года. Несмотря на загруженность по чтению лекций, уже осенью того же года он поручил великовозрастному студенту – бывшему фронтовику Р. Ш. Нигматуллину (как он сам об этом вспоминал), собрать последовательно блоки питания для трёхсантиметровых клистрона и магнетрона американского производства. По-видимому, эти созданные блоки позволили первым ученикам Евгения Константиновича – И. М. Романову и Н. Н. Непримерову завершить разработку своих первых спектрометров ЭПР и ФМР, а Завойскому – завершить исследования и опубликовать

новые статьи уже в 1947 году. По сути, эти и другие работы, в которых также принимал участие С. Г. Салихов, и стали началом экспериментальных исследований в физтехе.

В сентябре 1947 года Е. К. Завойский сменил тематику своих научных исследований, перейдя в Москву, в лабораторию № 2 (будущий Курчатовский институт). На посту заведующего сектором физики его сменил Б. М. Козырев. Естественно, что основной научной тематикой сектора были экспериментальные и теоретические исследования по магнитной радиоспектроскопии. Причём, на первом этапе основным экспериментатором был перешедший из КГУ С. Г. Салихов – многолетний помощник Е. К. Завойского по выполнению экспериментов по ЭПР. В те же годы единственным теоретиком в секторе был С. А. Альтшулер, он занимал с 1948 года должность с.н.с. по совместительству. Несмотря на малочисленность, этому коллективу (С. А. Альтшулер, Б. М. Козырев, С. Г. Салихов) в 1947–1948 годах удалось выполнить ряд исследований, в ходе которых было открыто явление ЭПР в свободных радикалах (1947 г.) и обнаружены проявления сверхтонкого взаимодействия в спектрах ЭПР. Они впоследствии вошли в “золотой фонд” научных достижений КФТИ в период его становления (Сб. “Казанский физико-технический институт им. Е. К. Завойского КазНЦ РАН”, 2016).

Новый этап в становлении физических исследований в КФТИ начался с приходом в сектор физики уже успевших повоевать на фронтах Великой Отечественной войны выпускников физфака КГУ Акима Иосифовича Ривкинда и Нургаяза Салиховича Гарифьянова. Первый из них возглавил исследования по ЯМР, а второй – по ЭПР. Они сравнительно быстро “обросли” учениками и впоследствии возглавили соответствующие лаборатории. Поэтому неслучайно, что все упомянутые выше учёные (в общем авторском коллективе) получили премию Президиума АН СССР за работы по парамагнитному резонансу, выполненные в 1952 и 1953 годах. По существу, в тот момент экспериментальные исследования по радиоспектроскопии в Казани проводились только в КФТИ, и С. А. Альтшулер также был их теоретическим руководителем. Несомненно, ярким экспериментатором в те годы был Ю. Я. Шамонин, получивший медаль на Всемирной выставке в Брюсселе за создание и экспозицию установки для демонстрации явления парамагнитного резонанса. В 1958 году Комитетом по делам изобретений и открытий при Совете Министров СССР была зарегистрирована работа Б. М. Козырева, Н. С. Гарифьянова, М. М. Зарипова “О значении спина ядра ^{57}Fe”. Можно только удивляться – как тогда, на аппаратуре, созданной своими руками, можно было получать такие превосходные результаты!

Вторая половина 50-х годов и начало 60-х годов стали этапом не только получения новых оригинальных результатов, но и началом становления научной школы Б. М. Козырева, за счёт приглашения нового поколения талантливых учеников, в основном, воспитанников физмата КГУ. Достаточно упомянуть имена Ю. В. Яблокова, Г. П. Вишневской, А. В. Ильясова, Э. Г. Харахашьяна, И. А. Сафина, Д. Я. Осокина, В. Л. Матухина, Р. С. Абдрахманова, ставших впоследствии докторами наук, руководителями новых научных направлений. Если как-то охарактеризовать направления исследований сектора физики, то по результатам они достаточно узнаваемо разделяются на два периода. Первый из них – до середины 50-х годов, характеризуется исследованиями, подтверждающими значимость открытия Е. К. Завойским эффекта ЭПР и возможными – пока только прогнозируемыми – новыми результатами и практическими применениями. В нём сказывается и влияние С. А. Альтшулера, работавшего тогда в филиале.

Примером тому является выполненная ещё в 1947 году работа С. А. Альтшулера, Е. К. Завойского и Б. М. Козырева по теории парамагнитной релаксации, в которой – впервые в мировой науке – сделано утверждение о том, что ширина и форма линии ЭПР в первую очередь определяются магнитными диполь-дипольными взаимодействиями магнитных ионов и обменными взаимодействиями между ними.

С уходом С. А. Альтшулера из института в 1953 году, заметно усилилось химическое направление исследований, во многом связанное с научными интересами Б. М. Козырева. Это, несомненно, способствовало продвижению ЭПР и ЯМР в органическую химию, а затем – в биологию и медицину. Недаром Козырева связывала многолетняя дружба с академиками Арбузовыми (сначала с отцом, а затем и с сыном). Так, ряд учеников Б. М. Козырева (например, А. В. Ильясов и И. Д. Морозова) впоследствии перешли в Казанский институт органической и физической химии. Соответственно такой направленности, выполняемые исследования проводились в жидкостях, растворах и более редко – в порошках твёрдотельных материалов. В то же время, начавшиеся в КГУ эксперименты методом ЭПР в основном проводились на монокристаллах диэлектриков, содержавших те или иные парамагнитные ионы. Особенно широко они стали развиваться после открытия в 1957 году на физмате КГУ проблемной лаборатории магнитной радиоспектроскопии под научным руководством С. А. Альтшулера.

Конечно, с точки зрения настоящего физика, изучение монокристаллов было более интересно и перспективно, особенно после создания в 1960 году первого лазера и дальнейшего стремительного развития квантовой электроники. Там уже стало необходимым проведение комплексных исследований с использованием ЭПР, ЯМР, оптической спектроскопии и других методов физики твёрдого тела. Для этих целей на физфаке в 1962 году создаётся ещё одна проблемная лаборатория – квантовой электроники.

Но и Борис Михайлович был богат своими идеями. К их реализации он привлекает всё новых молодых специалистов, в том числе и теоретиков. Многие годы, по крайней мере до середины 50-х годов, практически единственным теоретиком, сотрудничавшим с Б. М. Козыревым, был С. А. Альтшулер, хотя, в ряде случаев,

в обсуждении участвовали и молодые университетские теоретики – например, В. И. Аввакумов, М. М. Зарипов, И. В. Овчинников. Постепенно круг теоретиков, учеников С. А. Альтшулера, стал расширяться, особенно с возникновением большого интереса к процессам релаксации в водных растворах, содержащих магнитные комплексы. Эксперименты в этом направлении стали вестись с начала 50-х годов А. И. Ривкиндом с сотрудниками методом ЯМР, а затем с П. Г. Тишковым, Г. П. Вишневской и Ю. М. Рыжмановым по изучению релаксации в жидких растворах электролитов методом нерезонансного парамагнитного поглощения (метод параллельных полей). Большую роль в дальнейшем развитии подобных исследований сыграл также ученик С. А. Альтшулера, впоследствии академик АН СССР Камиль Ахметович Валиев, приглашённый в физтех. В те годы он уже заведовал кафедрой физики в Казанском педагогическом институте. Вокруг него, во второй половине 50-х годов, сложился коллектив молодых теоретиков: Р. Х. Тимеров, Р. М. Юльметьев. Первыми теоретиками, начавшими в КФТИ исследования по квантовой теории магнетизма и квантовой акустике, стали ученики С. А. Альтшулера – Александр Рахмиэлевич Кессель и Булат Мусович Хабибуллин. Именно они, вместе с Р. Х. Тимеровым, стали одними из первых сотрудников в организованном в мае 1961 года секторе теоретической физики при лаборатории физики, руководимой Б. М. Козыревым.

В целом, вторая половина 50-х годов, по существу, ознаменована исполнением большинства идей и замыслов Б. М. Козырева. Именно по его инициативе и постоянной поддержке начались исследования парамагнитного резонанса в свободных радикалах и изучение спектров ЭПР на электронах проводимости в металлах. Так, уже в 1956 году, Н. С. Гарифьяновым и Б. М. Козыревым была опубликована первая в новом научном направлении статья “Парамагнитный резонанс в металлическом литии”, а в 1960 году было выполнено более полное изучение ЭПР в металлах (авторы: Б. М. Козырев, Н. С. Гарифьянов, А. В. Ильясов). Причём основным объектом были образцы лития, а исследования проводились при комнатной температуре. В последующие годы продолжение исследований по электронной спиновой спектроскопии уже под руководством Э. Г. Харахашьяна привело к развитию в физтехе нового направления по исследованию эффектов ЭСР и спинового эха в сверхпроводниках и созданию научной лаборатории физики металлов.

В институте выросли прекрасные экспериментаторы, способные не только выполнять измерения, но и создавать новую оригинальную аппаратуру: Н. С. Гарифьянов, А. И. Ривкинд, И. А. Сафин, Ю. В. Яблоков. Только с помощью созданных в лаборатории спектрометров удалось проводить исследования в таком широком интервале научных направлений: Н. С. Гарифьянов – ЭПР-спектроскопия координационных соединений; Ю. Я. Шамонин – ЯМР высокого разрешения; И. А. Сафин, Д. Я. Осокин – ядерный квадрупольный резонанс; П. Г. Тишков, Г. П. Вишневская – нерезонансный метод поглощения в параллельных полях для исследования релаксационных процессов. Венцом научной деятельности Б. М. Козырева в 40–50-е годы стало написание и опубликование в 1961 году первой в мире монографии “Электронный парамагнитный резонанс” (совместно с С. А. Альтшулером).

Шестидесятые годы

Шестидесятые годы, на мой взгляд, можно считать для физтеха переходом от детства к юности. Причём первая их половина стала для меня и лаборатории физики (как тогда называлась лаборатория под руководством Б. М. Козырева, куда с 1961 г. входил сектор теоретической физики), решающим периодом. Уно Херманович Копвиллем не стал менять направления исследований сотрудников, сидевших в 43-ей комнате, а только взял аспиранта В. Р. Нагибарова. Основное направление исследований Копвиллема и Нагибарова состояло в теоретическом рассмотрении проблем радиоспектроскопии, магнитной квантовой акустики, спинового эха и его приложений. По-видимому, уже тогда у Копвиллема родилось желание обзавестись и собственным экспериментом в этом направлении. Это он первично осуществил, приняв в 1962 г. Л. И. Медведева на должность м.н.с., – с задачей создания лазерной установки; и меня – для создания спектрометра магнитоакустических резонансов. В принципе, к этому направлению с 1968 г. примыкал и А. Р. Кессель, который, будучи аспирантом С. А. Альтшулера, занимался теорией магнитоакустических резонансов. Надо ещё раз отметить благородство характера Бориса Михайловича, который, несмотря на дефицит помещений в физтехе, сумел выделить мне и Медведеву по 2 кв. метра в криогенном корпусе. Он поделился и штатными единицами (м.н.с.). Все последующие годы моего пребывания в физтехе я всегда ощущал отеческое внимание с его стороны и поддержку в сложных обстоятельствах, например, при создании новой лаборатории под моим руководством в 1968 году.

Благодаря бескорыстной поддержке К. П. Ситникова, разрешившего мне забрать все изготовленные мною электронные блоки и электромагнит с блоком питания, а также помощи с помещением от Б. М. Козырева, я сумел в течение всего двух месяцев снова собрать акустомагнитную установку и повторить обнаруженное мною ещё в КГУ нерезонансное поглощение ультразвука системой электронных спинов в хромокалиевых квасцах. При помощи Эдуарда Георгиевича Харахашьяна, в то время уже руководившего криогенной группой, мне удалось создать низкотемпературную часть для исследований, вплоть до жидкого азота.

Уже в 1962 году У. Х. Копвиллемом совместно с аспирантом В. Р. Нагибаровым было выполнено первое теоретическое рассмотрение нелинейного взаимодействия лазерных импульсов с веществом, в результате которого был предсказан эффект возникновения светового (фотон-

ного) эха. Уже через два года предсказанный эффект был обнаружен в США, а затем, в 1972 году, был повторён в физтехе В. А. Пирожковым, Р. Г. Усмановым и В. В. Самарцевым (впервые в СССР).

Первая половина 60-х гг. стала завершающим этапом для трёх докторских и десятка кандидатских диссертаций сотрудников лаборатории физики. До этого времени единственным доктором наук, после ухода Е. К. Завойского и С. А. Альтшулера, был Б. М. Козырев, защитивший диссертацию ещё в 1957 году. Докторами наук стали уже вполне сформировавшиеся и имевшие своих кандидатов наук Аким Иосифович Ривкинд (1963), Нургаяз Салихович Гарифьянов (1966), Уно Херманович Копвиллем (1966). Первые два ранее прошли через нелёгкие фронтовые дороги, а последний, до 1947 года – через трудовой фронт с вырубкой леса в уральской тайге. Все трое практически были ровесниками, им в начале 60-х только перевалило за сорок, они были полны замыслов и обладали громадной творческой энергией для их воплощения.

Так же успешно были завершены диссертационные исследования рядом молодых учёных. Следует отметить, что реализация разработанных ими установок ограничивалась только отсутствием в СССР необходимых электронных компонентов или другого лабораторного оборудования. Тем не менее, кандидатами наук стали А. Р. Кессель, Ю. В. Яблоков, П. Г. Тишков, В. А. Голенищев-Кутузов, Б. М. Хабибуллин, В. Р. Нагибаров, Г. П. Вишневская, А. В. Ильясов, И. А. Сафин, Э. Г. Харахашьян, Н. Р. Яфаев. Все они позднее стали руководителями новых научных направлений и сами вырастили учеников, многие из которых позже возглавили научные подразделения в родном физтехе.

Для дальнейшего ускорения экспериментальных исследований по ЯМР и ЯКР и развитию работ по созданию более эффективных импульсных спектрометров ЯМР и ЯКР нового поколения во вновь созданную лабораторию ядерного магнетизма Б. М. Козыревым был приглашён на работу целый ряд молодых специалистов из КАИ и КГУ. В их числе – И. Б. Хайбуллин, Д. Я. Осокин, А. Н. Гильманов, В. К. Нурмухаметов, М. Р. Зарипов, Н. К. Андреев, Г. Р. Еникеева, В. Л. Матухин и ряд других. Не все прижились на новом месте, но другие постепенно стали на многие годы ведущими учёными и разработчиками новой техники в физтехе. В дальнейшем, многие из них, уже со своими учениками, перешли на новые, ещё более современные тематики: ЯМР-томография, нормальная и высокотемпературная сверхпроводимость, радиационные воздействия на материалы. А в классическом направлении ЯКР больших успехов достиг Дмитрий Яковлевич Осокин, создавший уже в 1969 г., под руководством И. А. Сафина, низкочастотный когерентный спектрометр ЯКР, пригодный для поиска частот ЯКР и релаксационных измерениях в многочисленных соединениях азота.

Итак, по своим результатам, шестидесятые годы стали одними из самых удачных для физтеха. Во-первых, была создана новая лаборатория в отделе магнитной радиоспектроскопии – ядерного магнетизма. Её заведующим стал д.ф.-м.н. А. И. Ривкинд (1965 г.). Сектор теоретической физики был преобразован в самостоятельную лабораторию квантовой акустики под руководством У. Х. Копвиллема (1965 г.). Важным этапом является и начало строительства нового лабораторного корпуса (1965 г.). В 1968 году проведены изменения в структуре института. В отделе радиоспектроскопии появилась ещё одна лаборатория – лаборатория ЭПР, руководителем которой стал д.ф.-м.н. Н. С. Гарифьянов. Тогда же лаборатория квантовой акустики была преобразована в отдел с аналогичным названием, с двумя лабораториями: электронного акустического парамагнитного резонанса (зав. отделом и лабораторией – У. Х. Копвиллем), и ядерного акустического магнитного резонанса (рук. – В. А. Голенищев-Кутузов).

В эти же годы были высоко оценены научные достижения Б. М. Козырева. В 1965 г. ему присвоено почётное звание “Заслуженный деятель науки и техники Татарской АССР”, а в 1968 г. он был избран членом-корреспондентом Академии наук СССР.

Появилось в физтехе и новое научное оборудование. Так, в отделе радиоспектроскопии были получены спектрометры ЭПР JES-3BSX (Япония), B-ER 4185 (ФРГ), интерферометр Фабри-Перри (ГДР).

Однако, и сотрудники физтеха продолжали разработки более современной и не выпускавшейся в промышленном масштабе радиоспектроскопической аппаратуры. Так, группой выпускников КГУ под руководством М. Л. Фалина, а также В. П. Мейкляра, был разработан и изготовлен первый в СССР спектрометр двойного электронно-ядерного резонанса.

Отдел квантовой акустики получил самый совершенный в СССР на то время (1966 г.) спектрометр ЯМР высокого разрешения, а физтех в целом был также обеспечен наиболее усовершенствованной отечественной вычислительной техникой – ЭЦВМ “Минск-22” (1968 г.). Однако, и собственные приборные разработки совершенствовались с каждым годом. Особенно это касается тех приборов, которые серийно не выпускались ни в СССР, ни за рубежом. К таким приборам справедливо отнести первый в мире когерентный импульсный спектрометр, позволявший вести поиск частот ЯКР в широком диапазоне без дополнительной подстройки (1963 г.). Позднее, в СКБ института радиотехники и электроники были организованы разработка и мелкосерийный выпуск спектрометров МКР, причём научным руководителем промышленной разработки был И. А. Сафин.

В отделе квантовой акустики к концу 60-х гг. были созданы несколько акустомагнитных спектрометров по изучению резонансного взаимодействия ультразвуковых волн с электронными спин-системами на частоту 10 ГГц (Б. П. Смоляков); спектрометр двойных акустомагнитных электронно-ядерных резонансов (Н. А. Шамуков, золотая медаль ВДНХ СССР); спектрометр акустомагнитных ядерных резонансов (Ю. В. Владимирцев и И. И. Садыков).

Однако, самым главным приятным событием был успех в создании полного низкотемпературного блока для снабжения исследователей криогенными жидкостя-

Сотрудники отдела квантовой акустики. Слева направо: первый ряд: А. М. Шегеда, И. И. Садыков, В. В. Самарцев, В. А. Голенищев-Кутузов, Х. Г. Богданова, А. В. Алексеев; второй ряд: Н. Р. Садыков, Ю. В. Владимирцев, В. Ф. Тарасов, Г. С. Шакуров, Н. К. Соловаров, С. А. Мигачёв, Н. А. Шамуков, В. С. Романов.

ми – азотом и гелием: азотная станция ЖАК-80 (1960 г.), водородная ожижительная станция ВОС-3 (1961 г.); в 1963-м – гелиевый ожижитель; в 1970-м – гелиевая ожижительная машина безводородного цикла и азотная станция АЖК.

И, хотя в первые годы работа с жидким гелием была довольно трудоёмка, но уже к 1965 году ряд сотрудников Н. С. Гарифьянова и В. А. Голенищева-Кутузова (Т. А. Альтшулер, Н. А. Шамуков, Ю. В. Владимирцев) сумели приспособить свои спектрометры для измерений при гелиевых температурах и даже получить новые результаты. Это позволило физтеху, совместно с КГУ, стать соорганизатором очередного совещания по физике низких температур. Казань стала шестым городом в СССР, где выполнялись научные исследования при жидком гелии.

Если начало 60-х годов стало рождением нового направления в нелинейной когерентной оптике с предсказанием эффекта светового эха, то конец шестидесятых ознаменовался обнаружением и, не менее достоверным, теоретическим объяснением нового физического эффекта – электроакустического эха. Другое название – “поляризационное эхо” – возрождение когерентности электроакустических колебаний в пьезоэлектриках после воздействия на них импульсов переменного электрического поля. За этот обнаруженный эффект И. А. Сафину и А. Р. Кесселю, совместно с сотрудниками Ленинградского ФТИ им. А. Ф. Иоффе Н. И. Крайник и С. Н. Поповым, был выдан диплом на открытие. Позднее, в физтехе Б. П. Смоляковым, было обнаружено поляризационное эхо с длительной памятью в СВЧ-диапазоне (10 ГГц), а В. М. Березовым, В. Д. Корепановым и В. С. Романовым – долгоживущее поляризационное эхо в пьезоэлектрических порошках.

Доказательством возросшего экспериментального мастерства, глубины теоретических обоснований полученных результатов и предсказаний новых эффектов стало активное участие учёных КФТИ во Всесоюзной юбилейной конференции с приглашением иностранных учёных “Парамагнитный резонанс 1944–1969”, проведённой в Казани. Конференция стала большим событием для Татарстана и особенно – для КГУ и Казанского филиала АН СССР. Её торжественное открытие проходило в конференц-зале Татарского обкома КПСС на площади Свободы. Среди основных докладов, сделанных на конференции и опубликованных в юбилейном сборнике “Парамагнитный резонанс (1944–1969)” (М.: Наука, 1969), наряду с докладами Е. К. Завойского, А. Кастлера (Нобелевского лауреата), К. Гортера, С. А. Альтшулера и Б. М. Козырева, ряда других известных отечественных и зарубежных учёных, опубликованы 8 докладов наших учёных, в которых изложены результаты последних работ руководимых ими рабочих групп и лабораторий. Основными докладчиками были: Б. М. Козырев, Н. С. Гарифьянов, А. И. Ривкинд, Ю. В. Яблоков,

У. Х. Копвиллем, Г. П. Вишневская, В. Р. Нагибаров, В. А. Голенищев-Кутузов.

Написав этот раздел, я задумался. Поскольку с конца шестидесятых прошло уже, без малого, полвека, мои радужные воспоминания о достижениях того времени могут быть преувеличены, тем более, что я был их активным участником. Развеять эти мои сомнения помог буклет 2016 г., изданный к 70-летнему юбилею КФТИ. Его составители и редакторы А. А. Калачёв, В. К. Воронкова, С. М. Ахмин, Л. В. Мосина в те годы, о которых здесь идёт речь, были так молоды, что не участвовали в работе института и поэтому я ссылаюсь на их оценки. В разделе "Дорогами научных открытий" отмечены практически все научные достижения КФТИ в период его становления и развития, отражённые в моих воспоминаниях.

Семидесятые годы

Как я уже отмечал выше, физтех в 70-е годы перешёл во взрослую жизнь и, как положено, вступил в период и больших радостей, и больших неприятностей. Конец 60-х – начало 70-х гг.: в институте начался этап значительного расширения производственных площадей, как за счёт ввода в конце 1970 г. главного здания по Сибирскому тракту, так и путём постепенного переезда ряда сотрудников ИОФХ и Геологического института в новые здания. Вторая приятная новость: с конца 60-х – начала 70-х годов начался приём новых сотрудников, в большинстве – в виде аспирантов – выпускников физфака КГУ. Те из них, что сумели преодолеть все сложности и тяготы научной жизни, сейчас почти приблизились к пятидесятилетнему рубежу пребывания в физтехе. Они многого достигли в науке. Достаточно указать, что их имена значатся в академических справочниках и энциклопедиях Татарстана. Назову основных – тех, с кем мне до сих пор приходится общаться на конференциях, диссертационных советах и прочих научных мероприятиях: Р. И. Баязитов, Х. Г. Богданова, А. А. Бухараев, В. К. Воронкова, М. Ф. Галяутдинов, И. А. Гарифуллин, Л. В. Мосина, С. А. Мигачёв, В. И. Петухов, В. А. Жихарев, В. В. Самарцев, В. Ф. Тарасов, Г. Б. Тейтельбаум, Н. М. Сулейманов. Возможно, я запамятовал кого-то – прошу извинить меня за забывчивость… Многие из упомянутых с девяностых годов стали одновременно преподавателями ВУЗов, но сохранили верность физтеховским традициям – упорному труду, честности в научных исследованиях, надёжности и верности друзьям.

Научные достижения института неоднократно отмечались в Постановлениях Бюро отделения общей и прикладной физики АН СССР, руководимого в те годы академиком Л. А. Арцимовичем. Так, в 1969-м, на заседании Бюро отделения (где я присутствовал, как секретарь партбюро), после отчёта Х. М. Муштари, Лев Андреевич отметил, что успехи Казанского физтеха выше, чем достижения именитого Московского института кристаллографии, который отчитывался вместе с нами.

Одновременно, как сейчас можно уверенно утверждать, в начале 70-х гг. КФТИ испытал и первый кризис в своей истории, вызванный как объективными, так и субъективными причинами. К первым из них относится преждевременная смерть двух самых успешно работавших руководителей научных подразделений: Нургаяза Салиховича Гарифьянова (март 1970) и Акима Иосифовича Ривкинда (сентябрь 1973), а также – ранее заведующего отделом математики, профессора Г. С. Салехова (октябрь 1971). В октябре 1972 г. был освобождён с поста директора Х. М. Муштари, а в октябре следующего, 1973-го – также освобождён от занимаемой должности зав. отделом квантовой акустики и зав. лабораторией электронного акустического парамагнитного резонанса У. Х. Копвиллем.

Вместе с тем, следует отметить, что уход известных учёных физтеху удалось преодолеть в довольно короткий срок, поскольку к тому времени в институте возмужал ещё более молодой (до 40 лет) контингент учёных, который быстро заменил ушедших коллег. К тому же, большинство молодых вскоре защитили докторские диссертации. В хронологическом порядке: В. Р. Нагибаров (1971), В. А. Голенищев-Кутузов (1973), А. Р. Кессель (1974), Ю. В. Яблоков (1974). Они стали во главе как старых, так и вновь образованных научных подразделений. К уже перечисленным учёным можно отнести и выходца из КГУ Максута Мухамедзяновича Зарипова, который начиная с 50-х гг. сотрудничал с Б. М. Козыревым. С января 1971 года он стал заведовать лабораторией ЭПР отдела радиоспектроскопии, руководимого Б. М. Козыревым, затем, в январе 1972-го стал директором КФТИ, а в январе 1977 г. был назначен Председателем Президиума Казанского филиала АН СССР. В дальнейшем докторами наук стали и другие, относительно молодые учёные – И. В. Овчинников, В. В. Самарцев, Г. Б. Тейтельбаум, Д. Я. Осокин, И. А. Сафин.

К середине 70-х годов в физтехе сформировалась устойчивая, по крайней мере, до 80-х гг., организационная структура. В самый большой отдел – физики твёрдого тела (М. М. Зарипов) входили: сектор теоретической физики (А. Р. Кессель), сектор ЭПР твёрдого тела (Ю. В. Яблоков), лаборатория физики металлов (Э. Г. Харахашьян). В отдел радиоспектроскопии (Б. М. Козырев) – лаборатория ЭПР и парамагнитной релаксации, лаборатория ядерного магнетизма (И. А. Сафин), самостоятельный отдел квантовой акустики (В. А. Голенищев-Кутузов); группа роста кристаллов (Е. Ф. Куковицкий).

Названия отделов и лабораторий, с одной стороны, правильно отражали реальное положение физтеха в нашей стране – как главного центра по разработке новых методов и применений радиоспектроскопии и квантовой акустики. Это можно продемонстрировать тем фактом, что в 1976 г. С. А. Альтшулер получил "Диплом на открытие Акустического парамагнитного резонанса", а мне – уже в конце 90-х годов – было предложено написать две статьи: "Акустический парамагнитный резонанс" и "Акустический ядерный магнитный резонанс"

для Большой Российской энциклопедии, последний, 35-й том которой вышел в 2017 году.

Но с другой стороны, уже к концу 70-х всё более очевидным становилось утверждение, что дальнейшее развитие физики определено не только поиском новых эффектов, обнаружение которых связано с одним наиболее эффективным методом, как это было с ЭПР, ЯМР, световым эхо. Развитие таких новых прикладных физических направлений, как опто- и акустоэлектроника, наноэлектроника, высокотемпературная сверхпроводимость, спинтроника, основанных на использовании новых перспективных материалов и новых физических свойств, требует для дальнейших исследований большого набора разнообразных методов. Решение этой проблемы, как показали последующие десятилетия, возможно двумя путями: либо выполнение одной темы в нескольких лабораториях различных институтов, или даже стран, обладающих необходимыми методами и установками, либо – в одной укрупнённой лаборатории с набором необходимых методов и средств для достижения поставленной цели. На Западе, чаще всего, в наши дни используется первый путь. В России, вследствие отсутствия серьёзного финансирования институтов РАН, наши экспериментаторы также чаще всего работают за рубежом, но при этом, при излишней экономии расходов на науку, резко падает и уровень самих экспериментаторов.

Итак, в 70-е годы главным методом научных исследований, как следует из названий лабораторий, и по существу, были ЭПР и ЯМР, в различных вариантах и методиках.

Исследования Бориса Михайловича, с ближайшими сотрудниками, эффектов ЭПР и ЯМР в растворах, уже в середине 50-х годов привели его к пониманию важности процессов взаимодействия магнитного поля с ближайшим окружением в растворе (модель ближнего порядка, – как её называют в наши дни), которой теперь увлечён академик РАН А. И. Коновалов на примере “чистой воды”.

В те же далёкие 60–70-е годы подобные исследования продолжались по цепочке неупорядоченных объектов: жидкость–замороженный раствор–порошок–стекло–ситаллы–жидкие кристаллы. В этих исследованиях принимали участие многочисленные ученики Бориса Михайловича – Н. С. Гарифьянов, Ю. В. Яблоков, А. Р. Яфаев, А. А. Бухараев, Э. М. Абдрашитова, Р. С. Абдрахманов. Жаль, что впоследствии исследования разнообразных стёкол и стеклообразного состояния практически прекратились. Но зато, на смену им пришли исследования жидких магнитных кристаллов, под руководством И. В. Овчинникова, получившие мировое признание.

В те же 50-е годы, работавший в лаборатории Бориса Михайловича молодой теоретик В. И. Аввакумов, пришёл к важному выводу о динамической ян-теллеровской природе комплексов двухвалентной меди в растворе. Эта, первая в физтехе, работа по эффекту Яна-Теллера стала прологом к развитию многочисленных и разнообразных экспериментальных и теоретических исследований по влиянию этого эффекта на физические свойства диэлектрических, сегнетоэлектрических и магнитных кристаллов, которые начались в физтехе под руководством В. А. Голенищева-Кутузова и Ю. В. Яблокова уже в 70–90-е годы.

Классическим примером развития методов ЭПР и ДЭЯР стали исследования, проводимые М. М. Зариповым со своими ближайшими сотрудниками М. Л. Фалиным, В. А. Улановым и Ю. В. Яблоковым с учениками (В. К. Воронкова, А. Е. Усачёв, Т. А. Иванова, А. М. Зиятдинов), позволившие более полно исследовать примесные ян-теллеровские комплексы d-ионов, вначале в слоистых структурах перовскита, а затем и в других оксидных кристаллах. Были изучены особенности динамического и статического ян-теллеровких эффектов, а также кооперативного взаимодействия ян-теллеровских центров. Эти исследования продолжались и в более поздние годы, вплоть до начала XXI века, с привлечением разработанного в физтехе метода ЭПР в частотном диапазоне до 500 ГГц В. Ф. Тарасовым и Г. С. Шакуровым. Уместно отметить, что ряд участников глубокого исследования влияния ян-теллеровских центров на структурные, оптические и акустические свойства различных классов кристаллов уже в начале XXI века успешно защитили докторские диссертации: В. Ф. Тарасов, Г. С. Шакуров, В. А. Уланов, А. Е. Усачёв. В целом, многолетняя работа В. Ф. Тарасова и Г. С. Шакурова по разработке метода и изготовлению автоматизированного перестраиваемого по частоте 65–535 ГГц спектрометра ЭПР является прекрасным примером экспериментального успеха в физтехе в конце XX века.

Валерий Фёдорович, несмотря на большую загруженность в физтехе в недавние годы, уже более десяти лет успешно читает лекции на кафедре промышленной электроники Энергетического университета, за что ему особая благодарность.

В 70-е годы, после перехода (1972) в физтех, в отдел Б. М. Козырева уже известного теоретика Игоря Васильевича Овчинникова, под его руководством начались разработки научных основ нового направления на стыке физики и химии – по изучению магнитных жидких кристаллов. Эти исследования были одними из первых по применению методов ЭПР для подобных целей. И. В. Овчинников в прошлом окончил аспирантуру у С. А. Альтшулера, затем в 1963 г. защитил кандидатскую диссертацию, потом работал доцентом кафедры теоретической физики на физфаке КГУ. Постепенно собрав вокруг себя в физтехе коллектив молодых учёных, впоследствии составивший костяк самостоятельной лаборатории (С. А. Лучкина, И. А. Домрачева, И. Г. Бикчентаев, А. Константинов, Ю. Г. Галяметдинов, Г. И. Иванова), Игорь Васильевич начал экспериментальные и теоретические исследования по изучению магнитных жидких кристаллов с помощью спиновых зондов, в качестве которых выступали комплексы переходных металлов. В дальнейшем также стали использовать жидкокристаллические матрицы, позволившие значительно расширить информативность спектров ЭПР. В лаборатории впоследствии были синтезированы парамагнитные металлокомплексы, непосредственно обладающие жидкокристаллическими свойствами.

Эти исследования под руководством И. В. Овчинникова продолжаются и до сих пор. Они получили международное признание, а коллектив исследователей получил в 2002 году Государственную премию Республики Татарстан. Сам Игорь Васильевич представляет Россию в Международном консультативном комитете по металлосодержащим жидким кристаллам и является членом нескольких научных советов РАН. Можно только пожелать ему и всем сотрудникам лаборатории молекулярной радиоспектроскопии новых творческих достижений.

В этом же отделе в те годы, после защиты в 1965 г. кандидатской диссертации, продолжила свои исследования одна из самых заслуженных сотрудниц физтеха, ученица Б. М. Козырева Галина Петровна Вишневская. Именно ей в 1958 году Б. М. Козырев предложил, совместно с П. Г. Тишковым, заняться измерением коротких времён электронной релаксации в растворах. С тех далёких времён и до десятых годов XXI века, она продолжала исследования с рядом учёных (Ф. Н. Гумеров и другие) по электронной релаксации и резонансу парамагнитных ионов в растворах электролитов, поликристаллах и полимерах. Высокий профессионализм позволил ей с блеском не только выступать на многочисленных научных мероприятиях, но и читать курсы лекций “Строение и молекулярная динамика конденсированных сред” в Казанском университете.

Новое продолжение получили в 70-е годы исследования по нелинейной оптике, начатые в 60-е У. Х. Копвиллемом и В. Р. Нагибаровым. После их ухода из института, в отделе квантовой акустики это направление возглавил Виталий Владимирович Самарцев. Другим лидером в тегоды стал Евгений Иванович Штырков, который, работая в Государственном институте прикладной оптики, начал сотрудничество с физтехом ещё в шестидесятые годы. Перейдя в физтех в начале 70-х, он начал исследования сразу по двум направлениям: фотонному эхо и динамической голографии в сотрудничестве с В. В. Самарцевым. По второму направлению это вылилось в изучение взаимодействия мощного лазерного излучения с различными материалами, в том числе и с полупроводниковыми кристаллами. Эти исследования, выполнявшиеся с И. Б. Хайбуллиным и его сотрудниками, привели к разработке нового способа формирования монокристаллических слоёв – “лазерный отжиг”.

Эксперименты по изучению возможностей прямого наблюдения его проявлений получили новое продолжение во второй половине 70-х годов с приходом в отдел квантовой акустики уже опытного к тому времени экспериментатора Владимира Александровича Зуйкова. Тогда же образовалась сильная экспериментальная группа: В. А. Зуйков, В. А. Пирожков, Р. Г. Усманов, к которой позже идейно примкнули В. С. Лобков и ряд более молодых экспериментаторов. Постепенно вокруг В. В. Самарцева образовалась и группа теоретиков. Так 70-е годы стали началом нового направления в КФТИ, включающего в наши дни несколько лабораторий и групп, руководимых, наряду с “патриархом” В. В. Самарцевым, значительно более молодыми учёными – В. С. Лобковым, С. А. Моисеевым, А. Л. Степановым.

В семидесятые годы продолжились исследования теоретической группой отдела квантовой акустики под руководством Булата Мусовича Хабибуллина по физике металлов и связанных с ними других проблем: акустическому парамагнитному резонансу, а затем – и по физике тепловых фононов. Под руководством Б. М. Хабибуллина в физтехе выросли известные в наши дни теоретики (Б. А. Тимеркаев, В. Н. Лисин) и экспериментаторы – А. М. Шегеда и ряд других. Исследования по нелинейным процессам распространения фотонов и тепловых фононов в кристаллах продолжаются и в наши дни. Семидесятые годы в физтехе также характеризуются началом активной разработки новых научных направлений, не потерявших своей актуальности и по сей день. К первому из них, по праву, принадлежит разработка методов ионной имплантации и лазерного отжига.

Однако, в 1975 г. мог бы произойти ещё более грандиозный кризис физтеха, когда после отчёта о деятельности института и вполне благожелательного отзыва проверявшей нас комиссии под руководством академика Н. М. Эмануэля был представлен проект будущего направления научной деятельности физтеха. Он был разработан под руководством академика-секретаря ООФА А. М. Прохорова и согласован с Председателем Президиума КФАН, нашим директором М. М. Зариповым. В нём предполагалась полная перестройка научного направления института и перевод его на рельсы прикладного материаловедения, хотя в заключении комиссии Н. М. Эмануэля было признано, что институт является ведущим по радиоспектроскопии, квантовой акустике и теории пластин и оболочек. Против принятия проекта решительно выступил присутствующий на заседании Б. М. Козырев. В результате, решение о направлении научной деятельности Казанского филиала АН СССР и физтеха – в частности, было переписано самым идеальным для нас образом.

Развитие нового для казанских физиков направления – ионной имплантации связано с Ильдусом Бареевичем Хайбуллиным, к глубокому сожалению, рано ушедшему из жизни в разгаре научной, научно-организационной и общественной жизни в 2007 году, будучи членом-корреспондентом РАН, лауреатом Государственной премии СССР (1988) и Татарстана (1998). Именно ему, совместно с Евгением Ивановичем Штырковым, довелось стать основоположниками ещё одного научного направления в области физических эффектов взаимодействия высокоэнергетических ионных и лазерных пучков с веществом. Стоит отметить, что Евгений Иванович ранее стал одним из основоположников развития в СССР нового направления – физических основ резонансной динамической голографии. Признанием заслуг Е. И. Штыркова в этой сфере стало присуждение ему в 1982 г., вместе с коллективом известных советских учёных, Государственной премии СССР в области науки. Уже в семидесятые годы вокруг И. Б. Хайбуллина начал складываться коллектив молодых учёных

(В. И. Петухов, И. А. Файзрахманов, М. И. Ибрагимова, Я. В. Фаттахов, М. Ф. Галяутдинов, Р. М. Баязитов, Е. И. Штырков и ряд других специалистов), с помощью которого удалось расширить исследования по различным направлениям ионной имплантации. К ним можно отнести многолетние работы по модификации оптических покрытий, созданию новых магнитных тонкоплёночных материалов и узкозонных полупроводников. Активная работа этого коллектива постоянно поддерживалась в те годы директором физтеха М. М. Зариповым, за что он, вполне заслуженно, в составе коллектива, получил Государственную премию СССР в 1988 г.

А Евгений Иванович Штырков и в последующие годы продолжал свои научные исследования. Я не раз бывал с ним на различных научных мероприятиях и наблюдал, с определённой завистью, каким вниманием он пользовался среди других научных авторитетов, оставаясь весьма скромным и даже – несколько застенчивым, видимо, по природе, человеком.

В начале семидесятых в физтехе, под руководством Эдуарда Георгиевича Харахашьяна началось изучение металлов и сплавов, находящихся в сверхпроводящем состоянии, методом ЭПР. В определённом смысле, эти исследования были продолжением первых работ Н. С. Гарифьянова и Б. М. Козырева по обнаружению ЭПР в металлах. Тогда же, в 70-х, молодой коллектив экспериментаторов – Е. Г. Харахашьян, И. А. Гарифуллин, С. Я. Хлебников, Ф. Г. Черкасов, Ю. И. Таланов, и теоретик Г. Б. Тейтельбаум, осуществили первые эксперименты по наблюдению ЭПР в сверхпроводниках, а затем развернули широкомасштабное изучение различных типов сверхпроводников второго рода. Причём, эти работы происходили в жёсткой конкуренции с учёными из США и Германии. При исследовании ЭПР на ионах эрбия в сверхпроводящем лантане, было доказано возникновение нового дальнодействующего обменного взаимодействия между магнитными примесями в сверхпроводящей фазе. Последующее наблюдение магнитного упорядочения с сохранением сверхпроводимости привело учёных к пониманию того, что магнитный и сверхпроводящий порядки могут сосуществовать при условии их взаимной подстройки. Дальнейшая разработка методики измерений магнитного резонанса в классических сверхпроводниках позволила этому коллективу далее приступить к исследованию высокотемпературных сверхпроводников. Ранняя смерть Эдуарда Георгиевича Харахашьяна в 1982 году, в возрасте всего 48-ми лет, прервала его научную карьеру, но не прекратила эти исследования в КФТИ – сначала под руководством И. А. Гарифуллина, а затем – Г. Б. Тейтельбаума. Э. Г. Харахашьян (посмертно), И. А. Гарифуллин, Г. Б. Тейтельбаум, Н. Н. Гарифьянов (сын Н. С. Гарифьянова), совместно с университетскими коллегами, за эти и более поздние работы, включённые в цикл “Исследования природы наноразмерных свойств сверхпроводников методом магнитного резонанса”, получили Государственную премию Республики Татарстан в 2007 г.

В это же десятилетие, в физтехе, в отделе квантовой акустики и секторе теоретической физики, под руководством, соответственно, В. А. Голенищева-Кутузова и А. Р. Кесселя развернулись теоретические и экспериментальные исследования по нелинейной динамике взаимодействия коротких (меньше релаксационных времён) электромагнитных и акустических импульсов с электронными и ядерными спиновыми системами в диэлектрических и магнитных кристаллах. В том числе – по предсказанию акустического спинового эха, квантованию спинов в поле акустической волны (А. Р. Кессель, Н. К. Соловаров, М. М. Шакирзянов) и экспериментальному обнаружению этих эффектов, а также – магнитоакустических солитонов (В. Ф. Тарасов, Х. Г. Богданова). Этими работами была заложена основа для дальнейших исследований в области нелинейной квантовой акустики. Уже через четверть века ряд учёных, работавших в области квантовой акустики, получили в 2011 г. Государственную премию Республики Татарстан (сотрудники физтеха: Х. Г. Богданова, А. Р. Кессель, С. А. Мигачёв, М. М. Шакирзянов, с коллегами).

В отделе квантовой акустики в 70-е годы более широко развернулись прикладные исследования в основном сегнетоэлектрических кристаллов типа ниобата лития, дигидрофосфата калия, тантаната бария, уже используемых в квантовой электронике для управления параметрами лазерных пучков: модуляции, преобразования частоты, сканирования и других подобных применений. В первые годы выполнения этих проектов исполнителями были молодые, но уже достаточно умелые экспериментаторы: Ю. В. Владимирцев, Б. М. Смоляков, Н. А. Шамуков, С. А. Мигачёв. Во второй половине 70-х годов к ним присоединились Н. Н. Глебова и А. В. Голенищев-Кутузов; теоретиками были У. Х. Копвиллем, Н. К. Соловаров, Б. М. Хабибуллин, И. Ш. Ахмадуллин. Упор в таких исследованиях делался на возможности повышения стойкости кристаллов к лазерному воздействию, уменьшению оптических потерь, возможности управления линейными и нелинейными оптическими и упругими характеристиками. Именно эти условия диктовались нашими заказчиками, которые сами занимались разработкой новых лазерных систем. Они же снабжали нас новыми перспективными кристаллами с необходимой формой и оптической обработкой образцов, а также новыми лазерами и другими электронными приборами. Несколько отличной от проблемных лабораторий физфака, нами была выработана структура проводимых исследований. На первом этапе, с помощью разработанной оригинальной комплексной методики, включающей спектроскопию ЭПР и ЯМР, оптическую, акустическую и лазерную спектроскопию, изучались оптические, упругие и электрические характеристики исследуемых кристаллов (в том числе, при облучении мощными лазерными пучками) с целью установления разнообразных микро- и наноразмерных дефектов, включая и примесные ионы, понижающих оптическое и акустическое качество кристаллов. Поскольку было установлено, что наиболее активными и сильными дефектами являются примесные ионы металлов переходных групп,

то на втором этапе разрабатывались способы перевода этих ионов в неактивное состояние, и рассматривались для каждого материала способы повышения упругих и оптических характеристик. Все полученные отчёты по результатам исследований передавались заказчикам с рекомендациями для заводов-изготовителей ряда кристаллов, которые предназначались для управления лазерными и акустическими пучками.

Фундаментальные результаты наших исследований публиковались в виде статей и обзоров, докладывались на конференциях. Часть из них была опубликована в двух монографиях: “Магнитная квантовая акустика” (В. А. Голенищев-Кутузов, В. В. Самарцев, Н. К. Соловаров, Б. М. Хабибуллин // М.: Наука, 1977) и “Импульсная оптическая и акустическая спектроскопия” (В. А. Голенищев-Кутузов, В. В. Самарцев, Б. М. Хабибуллин // М.: Наука, 1988).

Наш коллектив успешно выполнял поставленные заказчиками задачи, получал премии, новые приборы и образцы для исследования. К сожалению, уже в 1992 г. наши заказные исследования были свёрнуты, в виду прекращения работ по разработке и изготовлению лазерных систем и других изделий электронной техники заказчиками.

Фундаментальные результаты научных поисков наших физтеховских учёных и коллег из промышленных НИИ нередко оформлялись в виде совместных статей и публикаций в отечественных журналах. Одним из главных результатов было установление роли ян-теллеровских ионов в колоссальном изменении оптических и упругих свойств оксидов переходных металлов, содержащих примесные ян-теллеровские ионы даже в концентрациях до 10^{-6}.

Вот так ещё раз было доказано предвидение Б. М. Козырева и В. И. Аввакумова о возможности образования кластерных структур вокруг ян-теллеровских ионов, искажающих кристаллическую структуру (статический ян-теллеровский эффект).

Если кратко подвести итог семидесятым годам XX века, то можно констатировать, что физтех удержал свои позиции в области физики, как по результатам классических исследований, к которым, несомненно, относились тогда радиоспектроскопия и квантовая акустика, что подтверждалось тогда комплексными проверками института комиссиями ООФА под руководством А. С. Боровика-Романова (1977) и К. А. Валиева (1985), так и прикладных разработок. Практически ежегодно научные результаты физических лабораторий отмечались в числе важнейших по естественным наукам в системе АН СССР. В институте стали развиваться и достигли значимых результатов по имплантации и лазерному отжигу полупроводников (М. М. Зарипов – Золотая медаль ВДНХ, КФТИ – Диплом I степени). Было установлено прямое взаимодействие с организациями, занимающимися разработкой и изготовлением приборов и устройств опто- и акустоэлектроники.

Заключение

Я заканчиваю свои воспоминания о научной жизни физтеха концом семидесятых – началом восьмидесятых годов. Этот отрезок был для меня своеобразным переломным периодом: подходил к концу этап активного применения методов ЭПР и ЯМР в физических исследованиях; эти методы постепенно становились всё более необходимыми в химических и биологических изысканиях и даже в практической медицине. Заканчивался этап использования акустических аналогов радиоспектроскопических методов. Вскоре, в конце 80-х годов, им на смену пришли другие методы, позволяющие измерять различные физические характеристики уже на уровне отдельных атомов или молекул. Символично, что этот этап для физтеха закончился уходом из жизни двух основоположников института: Хамида Музафаровича Муштари (1981) и Бориса Михайловича Козырева (1979). Обладая высоким интеллектом, глубоким пониманием философии науки, они во многом способствовали становлению и превращению физтеха в современный по тому времени научный центр.

Так совпало, что в 1979 г. я по совместительству перешёл на должность профессора мною же основанной кафедры промышленной электроники Казанского филиала Московского энергетического института, и часть своего времени и научных усилий пришлось расходовать там. Но я по-прежнему, до 1992 г. продолжал руководить работой лаборатории, активно участвовать в научной и общественной жизни физтеха и Казанского научного центра. А в мыслях своих я всегда чувствую себя физтеховцем.

Память о физтехе поддерживается не только встречами с физтеховцами и даже, уже достаточно редким, написанием совместных статей, но и постоянным общением с бывшими сотрудниками КФТИ, а ныне – профессорами, доцентами, заведующими кафедрами и даже факультетами Энергоуниверситета. Все они добились немалых успехов в физтехе. Их имена часто встречались в моих заметках: Р. С. Кашаев, Н. К. Андреев, Г. Р. Еникеева, О. Е. Зуева, М. П. Желифонов, В. Л. Матухин, В. А. Уланов, А. Е. Усачёв. Во многом их трудами бывший филиал Московского энергетического института за эти годы превратился в один из наиболее престижных ВУЗов России в области энергетического образования.

Пользуясь правом автора, мне хотелось бы пожелать здоровья и дальнейших успехов моим дорогим коллегам по отделу квантовой акустики, чей творческий труд в физтехе приближается, а у некоторых – и перевалил за полувековой рубеж (!). Это Х. Г. Богданова, Н. К. Соловаров, В. Н. Лисин, В. Ф. Тарасов, С. А. Мигачёв, А. М. Шегеда, В. С. Романов, В. В. Самарцев, Н. Г. Куркина, Г. С. Шакуров, Р. И. Шахмуратов. Когда я вас встречаю в физтехе, моё сердце наполняется радостью и надеждой, что эта встреча – не последняя!

В. А. Голенищев-Кутузов

Валентин Серапионович Романов. К 80-летию со дня рождения

Спасибо за то, что ты есть,
За то, что твой голос весенний
Приходит, как добрая весть,
В минуты обид и сомнений.

А. Дементьев

Валентин Серапионович Романов

10 марта 2017 года исполнилось 80 лет кандидату физико-математических наук, научному сотруднику лаборатории нелинейной оптики Казанского физико-технического института Валентину Серапионовичу Романову.

В. С. Романов родился в 1937 году в многодетной крестьянской семье в деревне Сизнер Хлебниковского района Марийской АССР. В 1956 году он окончил удмуртскую среднюю школу, а затем в период 1957–58 гг. работал рабочим сначала в артели “Красная звезда” (г. Можга Удмуртской АССР), а позднее – на строительстве Сталинградской ГЭС. С 1958 по 1961 год Валентин Серапионович учился на дневном отделении Казанского финансово-экономического института, после окончания которого был направлен на работу на одно из предприятий г. Навои Узбекской ССР в качестве бухгалтера-экономиста, где он, судя по всему, быстро понял, что у него другое призвание – физика. В 1962 году В. С. Романов возвратился в Казань и поступил на работу в Казанский государственный университет (КГУ) в отдел гидромеханики под руководством С. Ф. Сайкина, а затем был переведён на должность инженера кафедры бионики, где проработал до 1971 года. Одновременно в 1963 году Валентин Серапионович сдал экзамены и поступил на физический факультет КГУ, который успешно закончил в 1968 году по специальности “радиофизика и электроника”.

В январе 1971 года В. С. Романов поступил на работу в Казанский физико-технический институт (КФТИ) в качестве инженера в лабораторию электронного акустического резонанса, возглавляемую проф. У. Х. Копвиллемом, где долгое время работал вместе с В. М. Березовым, ставшим ему настоящим другом. Основным направлением его научных исследований стало поляризационное эхо (ПЭ) в пьезоэлектрических порошках и сегнетоэлектрических монокристаллах в области температур фазовых переходов. Группе сотрудников – В. М. Березову, В. Д. Корепанову и В. С. Романову – удалось экспериментально обнаружить в 1974 году явление долгоживущего ПЭ в пьезоэлектрических порошках и монокристаллах с долгой фазовой памятью в течение нескольких десятков суток. Этот уникальный результат был включен в число важнейших достижений АН СССР 1976 года. В 1978 году В. С. Романову удалось впервые обнаружить ПЭ в монокристалле сегнетовой соли в области температур фазовых переходов, где проявляются аномальные акустические свойства сегнетоэлектрических кристаллов. При этом формирование ПЭ в этих кристаллах происходит на суммарной и разностной частотах заполнения радиочастотных импульсов при обязательном присутствии постоянного электрического поля. Отметим и другие эффекты, наблюдение которых стало возможным благадаря активному участию Валентина Серапионовича: резкое переключение фазы долгоживущего ПЭ при определённых значениях амплитуды радиочастотных импульсов; существование минимума поглощения звука в области фазовых переходов; аномальная генерация звука и преобразование звуковых мод на гармониках и субгармониках; сжатие сигнала ПЭ по отношению к длительностям импульсов путём их частотной модуляции и наблюдение сигнала ПЭ как сигнала свертки трёх возбуждающих импульсов.

В. С. Романов является соавтором ряда авторских свидетельств и более сорока научных статей в центральных физических журналах. Эти результаты легли в основу его кандидатской диссертации, успешно защищённой в КГУ в январе 1996 года. Он внёс существенный вклад в появление в 1992 году коллективной монографии “Поляризационное эхо и его применение” (М.: Наука, 217 с.), где ему принадлежит одна из обзорных глав. Эта монография посвящена памяти его друга и соратника – В. М. Березова.

Около двадцати лет научная деятельность В. С. Романова связана с лабораторией нелинейной оптики, где он занимается реализацией экспериментальных исследований, а также принимает участие в подготовке молодых исследователей. Его природная смекалка и прекрасное знание законов физики делают незаменимым его участие в проведении сложных и, на первый взгляд, невыполнимых такелажных работ в институте. Кроме того, он полностью обеспечивал работу обратной гелиевой линии в здании КазНЦ РАН по ул. Лобачевского, д. 2/31. За свой труд В. С. Романов неоднократно награждался почётными грамотами АН СССР и РАН (1974 г., 2005 г.).

Валентин Серапионович – разносторонне развитый, интересующийся человек. Он любит поэзию и музыку. Сам пишет стихи, в том числе, – на удмуртском языке. Участвует в народном ансамбле “Напевы”, исполняющим

песни на пяти языках (русском, татарском, украинском, удмуртском и цыганском). Несмотря на свой возраст, занимается ещё и бальными танцами. Он был председателем Удмуртского национального общества в республике Татарстан. Его активность и неравнодушие содействуют укреплению дружеских связей между малыми народами в нашем многонациональном государстве. За добросовестную работу и общественную деятельность В. С. Романов был награждён видеокамерой и именными золотыми часами, которые вручил ему Председатель Совета Ассамблеи народов Татарстана Ф. Х. Мухаметшин.

От всей души поздравляем Валентина Серапионовича Романова с 80-летием и желаем ему всего самого доброго, а главное – здоровья!

В. В. Самарцев, А. М. Шегеда, В. Н. Лисин,
Р. Н. Шахмуратов, А. А. Калачёв,
Т. Г. Митрофанова, А. В. Шкаликов, И. З. Латыпов

Алевтина Павловна Блатт. К 80-летию со дня рождения

Алевтина Павловна Блатт

Алевтина Павловна Блатт была принята на работу в КФТИ в январе 1978 года на должность оператора ЭВС. Ей оперативность, доброжелательность и красоту сразу оценили сотрудники нашего института. С 1983 года она занимала должность заведующей копировально-множительным бюро. Её профессиональные знания и опыт позволяли успешно справляться с порученной работой, о чем прекрасно помнят сотрудники института. Все научные сотрудники обращались к ней – интернета не было, а научные статьи читали только в опубликованных журналах, поэтому приходилось делать много копий, и никому Алевтина Павловна не отказывала.

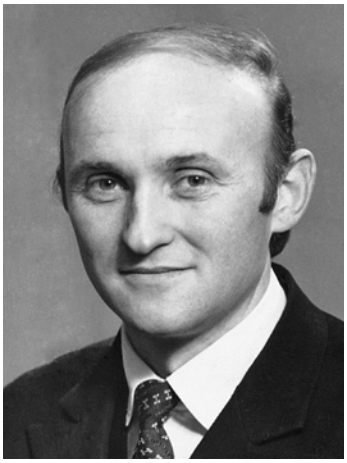
В Казанском физико-техническом институте Алевтина Павловна проработала до июня 2002 года. В 65 лет вышла на пенсию, но скучать, отдыхать и заниматься собой ей было некогда. Огромного внимания требовали четверо внуков. Посмотрите на её фотографию – никто и никогда не даст ей 80 лет.

От всей души, глубокоуважаемая Алевтина Павловна, поздравляем Вас с 80-летием! Пусть для Вас будет добрым каждый день. Желаем Вам бодрости, сил и энергии. Пусть успехи Ваших детей, четверых внуков и восьмерых правнуков дарят Вам много радости!

Р. М. Ерёмина

Алевтина Павловна в кругу своей большой и дружной семьи.

Юрий Васильевич Владимирцев. К 80-летию со дня рождения



Юрий Васильевич Владимирцев

5 октября 2017 года исполнилось 80 лет Юрию Васильевичу Владимирцеву, проработавшему в институте более 40 лет (1963–2004 гг). Он родился в городе Стерлитамак Башкирской АССР. В 1960 году окончил физико-математический факультет Казанского государственного университета имени В. И. Ульянова-Ленина по специальности астрономия и был направлен по распределению в ГИПО, где успешно занимался разработкой фотометрической аппаратуры.

В 1963 году Владимирцев был принят на должность младшего научного сотрудника в сектор теоретической физики КФТИ (выросший впоследствии в отдел квантовой акустики), где занимался разработкой и созданием нескольких видов акустических магнитных спектрометров под руководством В. А. Голенищева-Кутузова. В середине 60 годов в институте была запущена станция по ожижению жидкого гелия, что открыло новые возможности для эксперимента. Юрий Васильевич принял активное участие в разработке техники и методики акустических измерений при низких температурах, повышая эффективность акустических спектрометров. При этом один из спектрометров демонстрировался в 1967 году на ВДНХ СССР как одно из важнейших научных достижений. Результаты исследования кристаллов на этих спектрометрах были сформулированы Ю. В. Владимирцевым в кандидатской диссертации, защищённой в 1971 году.

Ю. В. Владимирцев. с коллегами. Слева направо: Н. А. Шамуков, Б. М. Смоляков, Ю. В. Владимирцев, М. А. Богоносцев, В. А. Голенищев-Кутузов, Х. Г. Богданова.

Последующая работа Юрия Васильевича была посвящена изучению фоторефрактивных, фотоакустических и других фотоиндуцированных явлений в сегнетоэлектриках и диэлектриках. Он постоянно занимался конструированием и усовершенствованием научной аппаратуры, разработкой новых методов исследований, поэтому в числе более 90 опубликованных им научных работ и научно-технических отчётов, есть ряд авторских свидетельств. Многие годы Юрий Васильевич был членом научно-технического совета при мастерской, участвуя в разработке, конструировании и создании многих экспериментальных установок института. В ряде комнат института и сегодня можно увидеть оптические столы, стеллажи, транспортные тележки сконструированные Юрием Васильевичем.

Юрий Васильевич постоянно в курсе новостей по своей первой научной специализации – астрономии, не порывает связи с астрономической обсерваторией имени Энгельгардта КГУ, посещает проходящие в Казани астрономические научные собрания.

И после ухода на заслуженный отдых Юрий Васильевич интересуется научной жизнью института, помогает советами. Особенным его вниманием пользуется экспериментальная мастерская. Юрий Васильевич помогает содержать в рабочем состоянии станочный парк института. В частности, когда вышел из строя шлифовальный станок, он нашёл неисправность в электрической схеме, вручную перемотал сгоревшую катушку и восстановил работоспособность станка. Он интересный рассказчик, любитель и ценитель оперы и балета, не пропускающий новые спектакли в Казани. Пешком Юрий Васильевич исходил всю Казань и может многое рассказать о достопримечательностях города.

Желаем Юрию Васильевичу бодрости и здоровья.

Н. К. Соловаров, Г. С. Шакуров, В. Ф. Тарасов

Лариса Васильевна Воронова. К 70-летию со дня рождения

Лариса Васильевна Воронова

17 января 2017 года юбилейный день рождения отметила Лариса Васильевна Воронова. В 1954 году она пошла в школу, а в 1965 году окончила её, поступив в Казанский химико-технологический институт по специальности “автоматизация и комплексная механизация химико-технологических процессов”. После окончания института по направлению начала работать на заводе “Оргситез” по обслуживанию контрольно-измерительных приборов, где получила большой опыт работы на производстве. Отработав 5 лет на заводе, Л. В. Воронова пришла на работу в НИИ охраны труда при ВЦСПС, в отдел промышленной вентиляции. В 1985 году институт заключил договор с Казанским физико-техническим институтом им. Е. К. Завойского. После окончания договора руководство КФТИ предложило Ларисе Васильевне перейти переводом на работу в КФТИ на должность старшего инженера группы КИП по метрологии.

В нашем институте Лариса Васильевна провела большую работу по классификации и паспортизации приборов для ввода данных в ЭВМ, осуществляла связь с приборостроительными организациями по вопросам рекламы и ремонта, вела работу по вопросам обеспечения государственных проверок и согласования графиков проверки с территориальной службой Госстандарт. С 12 августа 1991 года Л. В. Воронова была переведена на должность инженера 1 категории, с 1994 – ведущего инженера отдела материально-технического снабжения, продолжая совмещать работу по метрологии. В этой должности она занималась снабжением подразделений института материалами, необходимыми для их деятельности, ведала получением посылок и бандеролей, вела оформление деклараций по обороту спирта в Госалкогольинспекцию. С 1 декабря 2008 года она переведена на должность ведущего инженера в группу по организации государственных закупок.

На всех участках работы Лариса Васильевна показала себя как квалифицированный специалист и приятный в общении человек. Не случайно её трудовая деятельность отмечена 19 благодарностями. В 1980 году в ВНИИ охраны труда ВЦСПС ей было присвоено звание “Ударник коммунистического труда”, а в КФТИ им. Е. К. Завойского присуждена премия им. М. Л. Блатта.

Лариса Васильевна Воронова принимает участие в общественной жизни института: была профоргом АХЧ, долгое время работала в Совете ветеранов, активно участвует в ежегодных мероприятиях по вручению Международной премии им. Е. К. Завойского. Её художественный вкус часто помогает при оформлении многих культурных мероприятий.

От лица работников института искренне поздравляем Ларису Васильевну с юбилеем и желаем здоровья, счастья, благополучия и успехов во всём.

Н. А. Карташёва, Х. Л. Мухтасарова

Валентин Александрович Жихарев. К 70-летию со дня рождения

Валентин Александрович Жихарев

Пятьдесят лет тому назад в нашем институте появился студент-дипломник Валентин Жихарев, который начал свой путь физика-теоретика с решения задач по спиновой кинетике электронов в металлах. Работая под руководством профессора А. Р. Кесселя, Валентин быстро вошёл в курс дела и превратился в редкого среди теоретиков института специалиста, органично влившегося в экспериментальные исследования. Вместе с экспериментаторами из группы Э. Г. Харахашьяна ему удалось выполнить ряд интересных работ по спиновому эхо на электронах проводимости в металлах. Потом последовали и другие работы по особенностям магнетизма в металлических системах. В девяностые годы Валентин Александрович подключился к исследованиям по радиационной физике, проводимым группой И. Б. Хайбуллина, и выполнил серию работ по интерпретации нетривиальных физических явлений, возникающих в результате ионной имплантации. Оглядываясь на более чем тридцатилетний период работы В. А. Жихарева в КФТИ можно заключить, что он был среди тех, кто определял научную состоятельность и развитие института в те годы.

Однако не только этим отмечено пребывание Валентина Александровича в институтском коллективе. И тогда, и сейчас он был и остаётся человеком с тончайшим внутренним слухом. Здесь имеется в виду не только его редкостная музыкальная задушевность, которая сделала его одним из исторически первых бардов-исполнителей Казани и украшала песнями под гитару все научные конференции и школы с его участием. Всё это является лишь дополнением к тончайшей чуткости его сердца, позволяющей ему безукоризненно точно настраиваться на волну интересов товарищей, коллег, близких и просто случайных собеседников.

Не удивительно, что такой человек нашёл себя в педагогической деятельности, перейдя на работу в Казанский химико-технологический институт, где В. А. Жихарев в течение многих лет возглавляет кафедру высшей математики и является одним из авторитетнейших профессоров. Следует заметить, что шлифовку своего педагогического дара он начал задолго до этого – на своих детях. Совместно с любимой супругой Наташей ему удалось вырастить замечательных дочь и сына и дать им всестороннее и глубокое образование. Поскольку сейчас дети со своими семьями проживают вдали от родителей, причём в столицах разных государств, то педагогические усилия Жихаревых старших, направленные на нынешнем этапе уже на внуков, осуществляются с помощью скайпа. Однако, и в таком варианте этой деятельности сопутствует неизменный успех.

Нам особо приятно отметить, что тесная связь В. А. Жихарева с КФТИ никогда не прерывалась. Помимо того, что в течении многих лет он остаётся членом нашего Совета по защитам диссертаций, он по-прежнему открыт для нас – будь то обсуждение научной проблемы, составления отзыва или просто “по жизни”. В связи с достижением им очередной круглой даты хочется пожелать нашему Валентину Александровичу Жихареву крепкого здоровья, счастья, успехов в работе, и чтобы он и впредь освещал нашу жизнь светом своей личности.

Ю. И. Таланов, Г. Б. Тейтельбаум

Виолета Константиновна Воронкова. К 70-летию со дня рождения

Виолета Константиновна Воронкова

18 марта 2017 года исполнилось 70 лет Виолете Константиновне Воронковой – доктору физико-математических наук, учёному секретарю института, заведующей лабораторией спиновой физики и спиновой химиии.

Виолета Константиновна Воронкова родилась на Дальнем Востоке в Уссурийске, однако среднее образование получила в Казани, окончив с золотой медалью в 1965 году одну из старейших и лучших школ города (среднюю школу № 94). Своё образование Виолета Воронкова решила продолжить в Казанском государственном университете им. В. И. Ульянова-Ленина на физическом факультете. Специализировалась Виолета на кафедре радиоспектроскопии и квантовой электроники. Уже в студенческие годы в 1969 году она пришла на дипломную работу в Казанский физико-технический институт Казанского филиала АН СССР (КФТИ КФАН СССР) в группу Юрия Васильевича Яблокова отдела радиоспектроскопии, возглавляемого Борисом Михайловичем Козыревым, одним из основателей Казанской школы радиоспектроскопии. Дипломную работу “Парамагнитный резонанс двухвалентного кобальта в тетраэдрическом окружении” (руководитель Ю. В. Яблоков) Виолета защитила блестяще (результаты этой работы были опубликованы в ФТТ, Т.13(4), (1971)) и в 1970 году закончила с красным дипломом Казанский государственный университет по специальности “радиофизика и электроника”.

С 1971 по 1974 гг. Виолета Воронкова училась в аспирантуре КФТИ под руководством Юрия Васильевича Яблокова и Максута Мухамедзяновича Зарипова. Диссертация на тему “Парамагнитный резонанс ионов Cu(II) иCo(II) в тетраэдрическом окружении” была представлена ею в срок к окончанию аспирантуры и успешно защищена.

Последующую работу Виолеты Константиновны в нашем институте можно разбить на три крупных временных интервала и следующим образом сформулировать основные направления её исследований и полученные результаты.

В период с 1975 по 1999 гг. она совместно с Л. В. Мосиной (под руководством Ю. В. Яблокова) выполнила систематические исследования обменных взаимодействий в разных по строению и составу кластерах, синтезированных в Институте химии АН Молдавской ССР под руководством А. В. Аблова и в МФТИ под руководством В. В. Зеленцова. В эти же годы в рамках Сотрудничества социалистических стран активно исследовались совместно с Л. В. Мосиной димерные системы и слоистые ферромагнетики, синтезированные в Словацком техническом университете (И. Ковачик, Х. Лангфельдерова) и Университете им. Коменского (Й. Кречмар-Шмогрович) в Братиславе (Чехословакия), а совместно с А. Е. Усачевым и В. Е. Петрашенем проведены работы по изучению обменных взаимодействий между примесными ионами в кристаллах. В 1994 году Виолета Константиновна стажировалась в лаборатории Д. Гаттески (Университет Флоренции, Италия), а в 1995 году была командирована в Институт молекулярной физики ПАН (Познань, Польша) для проведения совместных исследований с Н. Пислевским. В конце этого периода ею были начаты исследования 3d-4f взаимодействий в низкоразмерных соединениях в сотрудничестве с химиками-синтетиками Я. Легенджевич и Е. Мрозинским (Вроцлавский Университет, Польша)

Работы В. К. Воронковой (первые работы выполнены вместе с Ю. В. Яблоковым) по исследованию методом ЭПР многоядерных кластеров с редкоземельными ионами являются пионерскими: выполнены первые исследования взаимодействия между ионами меди и редкоземельными ионами и показана перспективность метода ЭПР для исследования таких систем. Развита методология получения данных о величине взаимодействия с быстрорелаксирующими ионами при температурах, когда спектры последних не наблюдаются.

Второй этап включает 2000–2008 годы. В составе лаборатории молекулярной фотохимии Виолета Константиновна проводила исследования в сотрудничестве с Кевом Минуллиновичем Салиховым. Были продолжены эксперименты по тематике “Многоядерные кластеры” и ЭПР низкоразмерных систем, а также исследования в рамках новых направлений: фотовозбужденные системы и времяразрешенный ЭПР.

В 2002 году ВК стажировалась в группе Д. Штелика (Свободный Университет Берлина, Германия) а в 2004 году в группе К. Корвайя (Университет Падуи, Италия)

В 2000–2003 годах Виолета Константиновна руководила российской группой проекта INTAS “От моноядерных координационных соединений к новым полиметаллическим супрамолекулярным архитектурам и магнетикам на молекулярной основе”. Совместно с К. М. Салиховым, К. Корвайя и Л. Франком провела первое экспериментальное наблюдение нового механизма спиновой поляризации

Слева направо: Ю. В. Яблоков, В. К. Воронкова, А. Е. Усачёв.

триплетных экситонов, связанного с их триплет-триплетной аннигиляцией.

Закономерном результатом этого этапа научной деятельности Виолеты Константиновны была защита докторской диссертации “ЭПР-спектроскопия спиновых кластеров и низкоразмерных систем, построенных из кластеров” в 2009 году.

Во время третьего этапа с 2009 года по настоящее время руководитель лаборатории спиновой физики и спиновой химии В. К. Воронкова продолжает исследования многоядерных кластеров, интерес к которым вырос в связи с открытием мономолекулярных магнитов. Особое внимание уделяется изучению влияния спин-спинового взаимодействия в многоядерных кластерах с ионами диспрозия на температуру блокирования намагниченности и перспективам создания мономолекулярных магнитов на основе таких кластеров (совместные исследования с А. Пауэлл (Университет Карлсруэ, Германия) и Л. Чиботару (Лёвенский католический университет, Бельгия). В лаборатории развиваются новые методы исследования, в том числе методы импульсного ЭПР и времяразрешенного ЭПР.

Проф. К. Корвайя и В. К. Воронкова.

В последние годы коллектив, которым руководит Виолета Константиновна, исследует системы, в которых реализуется обменное взаимодействие с фотовозбуждёнными органическими молекулами. Впервые обнаружена поляризация электронных спинов метастабильных возбуждённых состояний в системах с медьпорфиринами. Впервые исследованы спин-поляризованные состояния фотовозбужденого димера, образованного двумя молекула медьпорфирина. Показано, что данная система обладает способностью формировать относительно долгоживущее возбуждённое состояние. Большой интерес к таким системах связан с возможностью создания молекулярных материалов, магнитные и спиновые свойства которых могут управляться светом. Исследования ведутся совместно с К. М. Салиховым, Р. Т. Галеевым, Р. Б. Зариповым, Ю. Е. Кандрашкиным, Л. В. Мингалиевой и А. А. Сухановым.

Виолета Константиновна является руководителем и исполнителем нескольких проектов РФФИ, проектов в рамках Программ Президиума и ОФН РАН.

Виолета Константиновна Воронкова руководила выполнением дипломных работ, под её руководством были подготовлены и защищены три диссертации на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук.

Она является автором более ста научных работ в академических и зарубежных журналах. Издана монография “Парамагнитный резонанс обменных кластеров” (Ю. В. Яблоков, В. К. Воронкова, Л. В. Мосина).

Виолета Константиновна Воронкова занимается научной работой увлечённо, её всегда отличает серьёзное и вдумчивое отношение к делу, требовательность к себе и коллегам. В коллективе она пользуется заслуженным авторитетом и уважением, исключительно хорошо организована сама и может организовать работу коллектива.

В 2000 году К. М. Салихов, директор института, предложил Виолете Константиновне стать учёным секретарём института. И эта должность дала новый толчок развитию столь присущей ей творческой активности. Назову только именные стипендии физтеха (имени Б. М. Козырева для молодых учёных и имени Н. С. Гарифьянова для аспирантов), которые были учреждены по инициативе Виолеты Константиновны, а также стендовую сессию итоговой

конференции, которая впервые была организована ею в 2000 году и которая стала неотъемлемой частью жизни физтеха в дальнейшем.

Для Виолеты Константиновны характерно (иногда гипертрофированное) чувство ответственности за то, что она делает. Стиль её работы – без мельтешения перед глазами и имитации бурной деятельности, а планомерное и последовательное служение делу до самоотвержения. Достаточно вспомнить, что на протяжении более десятка лет Виолета является Учёным секретарём международной конференции “Современное развитие магнитного резонанса”, что подразумевает практически круглогодичное включение в работу по подготовке и проведению этой конференции.

В научной работе Виолета Константиновна наглядно продемонстрировала потрясающую способность вникнуть в суть проблемы, найти пути наиболее целесообразного её решения и никогда не останавливаться на полпути, доводя исследование до законченного результата.

Следует отметить её коммуникабельность и способность плодотворно взаимодействовать с коллегами.

Деятельность Виолеты Константиновны была достойно отмечена многочисленными наградами и поощрениями, из них ограничусь упоминанием только Благодарственного письма Кабинета Министров Республики Татарстан (2009), звания Заслуженного деятеля науки Республики Татарстан (2013) и Почётной грамоты Федерального агентства научных организаций (2017).

Вспоминается празднование шестидесятилетнего юбилея физтеха: ярчайший праздник, множество поздравлений, море цветов, подарков и улыбок. На сцену поднимается Геннадий Лукич Дегтярев, ректор КГТУ-КАИ, в руках у него роскошный букет цветов. Кев Минуллинович Салихов готов принять этот букет, но Геннадий Лукич говорит, что эти цветы – поздравление женщинам физтеха! И Кев Минуллинович передаёт букет Виолете Константиновне в знак признания её женским лицом физтеха, его красой и гордостью, с чем мы Виолету Константиновну и поздравляем. И желаем ей много радости в достижении успехов в научном творчестве!

Л. В. Мосина

Слово признательности Виолете Константиновне Воронковой

Как хорошо, что есть юбилеи. Они дают хороший повод выразить своё отношение к соратникам, друзьям, коллегам. Так получилось, что в одном и том же выпуске Ежегодника физтеха мы отмечаем юбилеи двух коллег, Виолеты Константиновны и Валерия Фёдоровича. Для меня они глубокоуважаемые соратники.

В какой-то момент мне пришлось искать учёного секретаря физтеха. К этому времени я уже поработал как директор с тремя учёными секретарями и имел представление о требованиях к учёному секретарю. Выбор привёл меня к Виолете Константиновне. На моё решение серьёзно повлияла “родословная” Виолеты Константиновны. К этому моменту я имел уже немалый опыт весьма положительного сотрудничества с Ляйлей Васильевной и Сергеем Михайловичем по журналу “Applied Magnetic Resonance”, они исключительно ответственно и творчески подходят к своей работе. Оба они были из научной лаборатории Юрия Васильевича Яблокова. Более того, я знал, что Виолета Константиновна и Ляйля Васильевна подруги. Из этой же лаборатории был многолетний учёный секретарь института Н. Р. Яфаев. И уже при мне очень хорошим учёным секретарём был Анастас Ахметович Бухараев, тоже из этой лаборатории. Я предположил, что Ю. В. Яблоков собрал и воспитал людей, которые любят работу, ответственно подходят к своей работе. Годы сотрудничества с Виолетой Константиновной показали, что это был правильный выбор, и мой, и учёного совета института.

Учёный секретарь института согласно Устава одновременно является и помощником директора. Невозможно было бы мне переоценить её помощь. Нередко я даже не знал, что делать с той или иной директивой, формой. Я отсылал это Виолете Константиновне, и она всё это выруливала, объясняла мне, отвечала и т.д. Порой это мне казалось непостижимым. Перестройка РАН стала большим испытанием для работы учёного секретаря, так как сильно возрос водоворот бумажных и электронных документов. Самоотверженная работа Виолеты Константиновны восхищает.

Как конкретный, видимый пример я хочу привести издание Ежегодника. Вот сейчас уже в 17 раз выходит эта летопись Казанского физтеха. Виолета Константиновна очень много сил приложила к тому, чтобы регулярно составлялось это издание. Я не знаю ни одного института РАН, который столь же регулярно выпускал бы Ежегодник. Это большая и очень нужная работа.

Она ведь ещё успевает планировать и руководить работой одной из ведущих научных лабораторий в области ЭПР не только в России, но и в мире. Она признанный в мире эксперт в области молекулярного магнетизма и применения ЭПР спектроскопии для изучения молекулярного магнетизма, в том числе фотоиндуцированного молекулярного магнетизма и гиперполяризации электронных спинов.

Обращаясь к Валерию Фёдоровичу, я сказал, что совместная работа с ним в дирекции была для меня подарком судьбы. Но я, должно быть, везучий: я получил и другие подарки судьбы. Ещё одним замечательным подарком судьбы для меня является сотрудничество с Виолетой Константиновной. Я очень ей благодарен.

К. М. Салихов

Халил Латыпович Гайнутдинов. К 70-летию со дня рождения

Халил Латыпович Гайнутдинов

1 июня 2017 года исполнилось 70 лет со дня рождения Гайнутдинова Халила Латыповича, доктора биологических наук, профессора, ведущего научного сотрудника лаборатории спиновой физики и спиновой химии Казанского физико-технического института им. Е. К. Завойского.

Халил Латыпович родился в 1947 году в селе Тукай Омской области, основанной переселенцами-татарами, уехавшими в Сибирь по столыпинской аграрной реформе. В 1966 году он поступил на физический факультет Новосибирского государственного университета. Во время учёбы стал интересоваться биофизическими проблемами, поэтому два последних курса дополнительно посещал лекции на факультете естественных наук по молекулярной биологии, биохимии и физиологии. Дипломную практику проходил в Литве, в лаборатории биофизики мембран в Кардиологическом центре г. Каунаса. После окончания университета поступил на работу в Институт автоматики и электрометрии СО АН СССР в лабораторию профессора М. Б. Штарка (ныне академик РАН). Здесь определилась область его научной деятельности и интересов в биологических исследованиях – связь биофизических характеристик нейронов (нервных клеток) мозга с поведением, а также зависимость состояния нейронов от молекулярных и субклеточных процессов.

В 1989 году он с семьёй переехал из Новосибирска в Казань, поскольку был приглашён на работу в Казанский физико-технический институт КазНЦ РАН, в лабораторию химической физики, руководимую К. М. Салиховым. Здесь добавилась и новая область научных интересов. В содружестве с сотрудниками лаборатории магнитной радиоспектроскопии КФТИ (Ю. Г. Галяметдинов и др.) и сотрудниками Казанского энергетического университета под руководством Гайнутдинова Х.Л. начались исследования мембранных биосенсоров с целью повышения их чувствительности, температурного режима, с возможностью их применения для анализа характеристик воды в охлаждающих системах теплоэлектростанций.

В 1994 году Х. Л. Гайнутдинов защитил докторскую диссертацию по теме “Биоэлектрические (мембранные) механизмы индукции антителами генератора патологически усиленного возбуждения при развитии нейроимунных процессов”. В 1996 году был назначен учёным секретарём института, а в 2000 году стал заведующим отдельной лаборатории КФТИ – лаборатории биофизики. Основное направление работ лаборатории – применение методов магнитного резонанса в биологии, прежде всего исследование роли оксида азота при различных патологических состояниях организма. Данные исследования раскрывают механизмы нарушения функций на клеточном и организменном уровнях при инфарктах, инсультах, ограничении двигательной активности, а также при травме спинного мозга. Другим исследовательским направлением лаборатории стало продолжение работ Халила Латыповича по анализу клеточных механизмов обучения и памяти, пластичности нервной системы. Его работы, посвящённые важной модуляторной роли медиаторных систем, включая серотонин- и дофаминэргическую, в интегративной функции при обучении, известны широкому кругу специалистов – как в России, так и за рубежом. Ещё одним из направлений исследований Гайнутдинова Халила Латыповича является проблематика неустойчивости памяти при вспоминании информации, полученной ранее (явление так называемой реконсолидации), при котором память повторно перезаписывается, проходя фазу лабильности. Работы в данной области, в случае успеха, сулят широкое медицинское применение при самых разных психогенных заболеваниях, включая фобии и амнезии.

Учитывая огромный объём экспериментальных данных, полученный на сегодня в области нейрофизиологии, только люди, обладающие энциклопедическими знаниями в данной области, а также феноменальной памятью, могут рассчитывать на успешное продвижение вперёд по столь тернистому пути. Таким учёным в полной мере

1980 г., Новосибирск, Институт автоматики и электрометрии СО АН СССР.

является Халил Латыпович, человек поистине разносторонних знаний, широких взглядов и увлечений. Многим его коллегам хорошо известны его интересы и глубокие знания не только в области собственных научных исследований, но также в смежных областях, включая физику, химию и медицину. Возможно, отчасти, это объясняется образованием, полученным в юности в рамках Новосибирского государственного университета, но и, в не меньшей мере, это следствие личной любознательности и искреннего интереса, а также понимание отсутствия чётких границ между отдельными областями науки при исследовании сложных систем, коими и являются любая живая материя в общем и мозг в частности.

В 2012 году по результатам активной научной работы Х. Л. Гайнутдинов был удостоен звания Заслуженного деятеля науки Республики Татарстан.

За время своей работы Халил Латыпович воспитал целую когорту молодых исследователей, руководил научной работой студентов, аспирантов, молодых учёных, составив, таким образом, целую научную школу. Несомненно, это является одним из самых его больших достижений. Одних только диссертаций под его руководством было защищено более 10.

В настоящее время Халил Латыпович продолжает работать ведущим научным сотрудником в лаборатории спиновой физики и спиновой химии КФТИ, хотя основным местом его работы является Казанский федеральный университет. Х. Л. Гайнутдинов является профессором КФУ, читает лекции по общей и медицинской биофизике, по нейробиологии обучения и памяти. Высокий научный авторитет позволяет ему успешно участвовать в научных конкурсах РАН и РФФИ. Он сформировал дружный коллектив, объединённый не только общей тематикой исследований, но и чисто человеческими отношениями. Халил Латыпович всегда готов помочь своим сотрудникам, прикладывает много сил для становления молодых учёных, помогает научными советами и решением организационных вопросов, прививает навыки самостоятельной научной работы. Он глубоко заинтересован в успехе каждого своего ученика. Халил Латыпович – это человек-“борец”, который всегда прислушивается к мнениям и желаниям своего коллектива, и, опираясь на их поддержку, идет вперед к поставленным целям. Ему удалось создать в коллективе уникальную творческую обстановку, способствующую достижению высоких научных результатов.

Мы искренне поздравляем Гайнутдинова Халила Латыповича с юбилеем, желаем ему дальнейших творческих успехов, здоровья и долголетия!

В. В. Андрианов, Т. Х. Богодвид, Г. Г. Яфарова, Л. Н. Муранова, И. Б. Дерябина

Валерий Фёдорович Тарасов. К 70-летию со дня рождения

Валерий Фёдорович Тарасов

21 июня 2017 г. исполнилось 70 лет со дня рождения главного научного сотрудника Казанского физико-технического института, доктора физико-математических наук, профессора, заслуженного деятеля науки РТ Тарасова Валерия Фёдоровича.

Валерий Фёдорович окончил Казанский государственный университет в 1970 г. по специальности “радиофизика и электроника”. Свою дипломную работу “Импульсный источник тока электромагнита” он выполнял в отделе квантовой акустики КФТИ под руководством И. И. Садыкова. В КФТИ В. Ф. Тарасов начал работать с марта 1971 г. в должности инженера, с октября 1971 г. по октябрь 1974 г. он учился в аспирантуре под руководством В. А. Голенищева-Кутузова, и в 1977 г. защитил кандидатскую диссертацию на тему “Исследование нестационарных процессов в ядерных спин-системах методами акустического резонанса”. В 2002 г. В. А. Тарасов защитил докторскую диссертацию на тему “Субмиллиметровая ЭПР-спектроскопия примесных парамагнитных ионов в диэлектрических кристаллах”. За время работы в институте В. Ф. Тарасов прошёл все ступени научной карьеры, начиная от инженера и младшего научного сотрудника до заведующего лабораторией и главного научного сотрудника. В 1992–2015 годах В. Ф. Тарасов работал заместителем директора института по научной работе.

Вся научная деятельность В. Ф. Тарасова связана с разработкой, созданием и применением в научных исследованиях уникальных экспериментальных установок. В семидесятых годах им под руководством В. А. Голенищева-Кутузова был создан импульсный спектрометр для изучения

ядерного магнитного резонанса. На этом спектрометре им впервые в мире были получены сигналы ядерного спинового эхо, возбуждаемого комбинациями электромагнитных и акустических импульсов, и совместно с В. А. Кирсановым экспериментально обнаружен эффект квантования ядерных спинов в поле резонансной акустической волны.

В 80-х годах им совместно с Г. С. Шакуровым создан уникальный, перестраиваемый в широком диапазоне частот, спектрометр электронного парамагнитного резонанса. На этом спектрометре исследован широкий класс примесных парамагнитных центров в кристаллах, изучение которых недоступно для стандартных спектрометров ЭПР. Среди этих работ можно выделить обнаружение эффекта димерной самоорганизации примесных трёхвалентных ионов в монокристаллах синтетического форстерита и первое наблюдение эффекта Ханле в ЭПР-спектроскопии.

В последнее время В. Ф. Тарасов большое внимание уделяет вопросам динамики электронно-ядерных спиновых систем с целью практической реализации на их основе устройств квантовой информатики. Эти работы проводятся совместно с Р. Б. Зариповым и А. А. Сухановым на имеющихся в институте современных импульсных спектрометрах ЭПР производства фирмы “Брукер-Биоспин”. В ходе этих исследований были экспериментально обнаружены сигналы ЭПР аномальной формы, для объяснения которой совместно Н. К. Соловаровым была выдвинута гипотеза об одновременном возбуждении в высокоспиновых системах магнитных дипольных и электрических квадрупольных резонансных переходов.

В. Ф. Тарасову свойственен творческий подход к решению стоящих перед ним научно-технических задач. Он является автором и соавтором 10 авторских свидетельств и патентов на изобретения.

С 2002 г. В. Ф. Тарасов совмещает научную работу с педагогической деятельностью в Казанском государственном университете. Среди читаемых им курсов “Физические основы электроники”, “Информационно-измерительная техника и электроника”, “Физика сверхпроводимости” и др. В 2009 г. ему присвоено звание профессора по кафедре промышленной электроники. В свои 70 лет Валерий Фёдорович находится в расцвете творческих сил. Его научные проекты регулярно поддерживаются Российским фондом фундаментальных исследований.

Коллеги желают Валерию Фёдоровичу хорошего здоровья и успехов во всех видах деятельности.

Х. Г. Богданова

Ляйля Васильевна Мосина и Валерий Федорович Тарасов – ведущие торжественного заседания.

* * *

С Валерием Фёдоровичем, просто Валерой, я познакомился ещё будучи студентом первого курса физфака КГУ, хотя мы и учились в разных группах, но на одном потоке. Позже, уже после второго курса, вместе заколачивали костыли в городе Сарапуле, отрабатывая летние работы в бригаде железнодорожного строительно-монтажного поезда. Он сразу обращал на себя внимание своими аккуратностью и организованностью. На радиофизическом потоке не так уж и много было студентов, для которых приставка “радио-” означала что-то существенное, большинство шло, что греха таить, просто из-за большей на 10 рублей стипендии, но Валера был не из таких, очень похоже, что радиолюбительство “зацепило” его ещё в школьные годы. Во всяком случае, по отзывам однокурсников, к нему всегда можно было обратиться за квалифицированной консультацией по вопросам радиоэлектроники. Мы в дальнейшем многие годы работали в одних стенах, в одних подразделениях и я просто обязан подчеркнуть ещё одну весьма заметную черту его характера – Валера очень хороший семьянин. Для него семья и дети всегда значили так много, что иногда это даже было поводом для беззлобных подколок со стороны сослуживцев.

С. А. Мигачёв

Слово благодарности Валерию Федоровичу Тарасову

Мне надо было найти заместителя директора института по науке. Я выбрал Валерия Фёдоровича. Этот выбор был основан на двух обстоятельствах. Заместитель директора имеет немалую власть, принимает решения. Поэтому очень важно, чтобы он стремился к справедливости. Я пришёл к выводу, что Валерий Фёдорович – это человек справедливый. Конечно, нет какой-то идеальной, абсолютной справедливости: то, что представляется справедливым с одной стороны, может быть несправедливым с другой стороны. Но всегда очень важно держать в голове мысль о справедливости, стремиться к справедливости. Я знал, что Валерий Фёдорович в какое-то время был профсоюзным лидером. По моим представлениям, в институтах Академии наук, где мне пришлось до этого работать, в профсоюзные лидеры выбирали хороших людей с мыслью о справедливости, людей, которые стремятся действовать по справедливости. Общаясь с Валерием Фёдоровичем, я увидел, что он из числа таких людей.

Другое обстоятельство было чисто производственным. В жизни физтеха огромную роль играет криогенная станция. Ко мне регулярно приходили с проблемами по жидкому гелию, да и по жидкому азоту. Я в этом деле дилетант. Мне хотелось найти такого заместителя, который бы полностью взял на себя решение криогенных вопросов. Опять-таки общаясь с Валерием Фёдоровичем, я пришёл к выводу, что он может справиться с этой проблемой. И я предложил Валерию Фёдоровичу стать заместителем директора. Прошло несколько месяцев переговоров, пока он согласился с моим предложением. В ходе этих переговоров я также приложил все свои усилия, чтобы убедить его заняться высокочастотной ЭПР спектроскопией. Дело в том, что он к этому времени занимался микроволновой спектроскопией и был ориентирован на решение задач, связанных с созданием приборов ночного видения, а именно, на исследование полупроводников с узкой запрещённой зоной. Конечно, приборы ночного видения – это замечательная проблема. Но мне хотелось, чтобы в институте имени Е. К. Завойского была представлена высокочастотная ЭПР спектроскопия. Надеюсь, Валерий Фёдорович не сожалеет, что несколько поменял направление своих исследований. За свои работы по высокочастотному ЭПР он получил признание мирового сообщества ЭПР спектроскопии.

В. Ф. Тарасов обсуждает с К. М. Салиховым результаты эксперимента.

Наконец, Валерий Фёдорович согласился. Учёный совет института без проблем поддержал моё предложение, и он стал заместителем директора. Я был очень счастлив работать с ним. Все заботы по криогенным жидкостям он взял на себя и хорошо справился с этой проблемой. Когда Валерий Фёдорович защитил свою докторскую диссертацию, я поручил ему курирование работы планово-финансового отдела. И с этой работой он хорошо справился. Я часто советовался с ним. И всегда это было полезно.

Я очень рад, что нам удалось так организовать работу, что Валерий Фёдорович исполнение своих административных обязанностей мог успешно совмещать с научными исследованиями. Немало времени мы провели с ним в интересных научных дискуссиях. Я рад, что мы даже опубликовали совместную работу.

Годы совместной работы с Валерием Фёдоровичем я рассматриваю как один из подарков моей судьбы.

К. М. Салихов

Станислав Александрович Мигачёв. К 70-летию со дня рождения

Станислав Александрович Мигачёв

19 августа 2017 г. исполнилось 70 лет старшему научному сотруднику КФТИ Мигачёву Станиславу Александровичу, вся научная жизнь которого неразрывно связана с нашим институтом. После окончания в 1965 году средней школы он поступил на физический факультет Казанского государственного университета, который окончил в 1970 году, специализируясь на кафедре радиоспектроскопии и квантовой электроники. В этом же году поступил в аспирантуру КФТИ, отдел квантовой акустики. В 1972 году был переведён в инженеры, далее последовательно был старшим инженером, младшим и старшим научным сотрудником. С 1982 г. – кандидат физико-математических наук, диссертацию защитил в Казанском государственном университете им. В. И. Ульянова-Ленина.

Мигачёвым С.А. опубликовано около 80 статей в общесоюзных, общероссийских и международных научных журналах, получено в соавторстве 4 авторских свидетельства на изобретения и 2 патента. Он награждён знаком “Изобретатель СССР”. Являлся соруководителем либо консультантом по выполненным в группе и успешно защищённым пяти кандидатским диссертациям.

В течении ряда лет Мигачёвым С.А. велась работа в рамках грантов РФФИ по исследованию электронной структуры оксидных нелинейных кристаллов для квантовой электроники. Большое место в его научной биографии занимают экспериментальные исследования по изучению магнито-акустических свойств легкоплоскостных антиферромагнетиков, имеющих перспективы использования в качестве рабочих тел управляемых магнитным полем акустооптических устройств. Здесь следует отметить экспериментальное обнаружение и исследование ряда новых эффектов, подтверждающих основные теоретические положения о роли антиферромагнитного упорядочения в акустике и акустооптике сильных магнетиков. Обнаружены в легкоплоскостном антиферромагнетике α-Fe_2O_3 поворот плоскости поляризации прошедшей через образец поперечной волны, превращение линейно поляризованной волны в эллиптически поляризованную, акустооптическая дифракция света на звуке, обусловленная магнитоупругой модуляцией поляризации нормальных оптических мод. Проведено детальное исследование поведения квазиакустической ветви спиновых волн вблизи магнитного ориентационного фазового перехода по давлению.

Заметное место занимают прикладные исследования, выполняемые совместно с рядом организаций электронпрома, радиопрома и других министерств и ведомств СССР. Основные из них: “Исследование фотоиндуцированных лазерным излучением эффектов в активных материалах”, “Разработка методов повышения стойкости кристаллов к длительному воздействию оптических и электрических полей”, “Разработка акустических селективных фильтров радиосигналов”.

В 2011 году за цикл работ “Исследование и практическое применение эффектов взаимодействия акустических волн с квантовыми системами в кристаллах” Мигачёву С.А. в составе научного коллектива присуждена Государственная премия РТ в области науки и техники.

В течение ряда лет он плодотворно сотрудничает с сотрудниками кафедры промышленной электроники КГЭУ. Под его руководством там была разработана и создана установка для исследований оптоакустическим методом. По результатам применения методов оптоакустики

Не думай, всех он не съедает,
Даст подышать, и отпускает!
Автограф, глянь, ему поставил,
Чтоб сом в потомках Славу славил!

для целей дефектоскопии сотрудниками кафедры успешно защищены две кандидатские диссертации.

В последнее время Станислав Александрович успешно ведёт экспериментальные исследования оптических, фотопроводящих и диэлектрических свойств неупорядоченных сегнетоэлектриков – релаксоров.

Вызывает уважение его профессиональное отношение как к работе научной, так и к ненаучным занятиям. Приятный в общении, С. А. Мигачёв очень доброжелательно относится к коллегам. Всегда готов помочь как советом, так и каким-нибудь недостающим оборудованием или прибором. Большая часть его уникального научного оборудования изготовлена им лично, поскольку он давно прекрасно освоил специальности и токаря, и фрезеровщика.

Ну и нельзя также не отметить, что в более молодом возрасте Мигачёв С.А. был ведущим спортсменом-подводником Татарстана, лидером сборной республики, первым Мастером спорта СССР в Татарстане по наиболее сложному виду подводного спорта – подводному ориентированию. Многолетняя плавательная подготовка позволяет ему и сегодня применять полученные навыки в теперешнем подводном хобби – подводной охоте. На “лицевом счету” у него изрядное число весьма солидных добытых экземпляров, среди которых есть и сомы за два метра длиной, один из которых, не самый большой, добытый в Нижнекамском водохранилище, на снимке.

Есть устойчивая легенда, что во время вылазок на природу, Станислав успевает настрелять два ведра рыбы, неважно в каком водоёме, пока его товарищи всё ещё пытаются разжечь костёр.

Мы желаем Станиславу Александровичу крепкого здоровья и дальнейших научных успехов.

Х. Г. Богданова, А. М. Шегеда,
В. Н. Лисин, В. Ф. Тарасов

Булат Шавкатович Хамидуллин. К 70-летию со дня рождения

Булат Шавкатович Хамидуллин

В сентября 2017 года исполнилось 70 лет со дня рождения Булата Шавкатовича Хамидуллина, ветерана нашего института, главного специалиста группы информационной безопасности, телекоммуникационных и сетевых технологий.

Булат Шавкатович Хамидуллин родился 7 сентября 1947 года в г. Казань, в семье служащих. В 1965 году окончил среднюю школу № 99 и поступил в Казанский авиационный институт на радиотехнический факультет. По окончании института с марта 1971 года начал работать в КФ ВНИИФТРИ инженером. В этом же году осенью был призван в ряды Советской Армии и до 1973 года служил начальником отдельной группы радиоконтроля ПВО. Демобилизовался он в звании старшего лейтенанта инженера.

В последующие три года Б. Ш. Хамидуллин работал в Казанском государственном педагогическом институте на кафедре математического анализа.

В 1976 году Б. Ш. Хамидуллин был принят на должность старшего инженера по радиоэлектронике в группу обслуживания ЭВМ отдела прикладной математики КФТИ КФАН СССР.

В 1989–1992 гг. он руководил группой технического обеспечения ЭВМ КФТИ, был общественным инспектором по технике безопасности и охране труда ВЦ, принимал активное участие в работе добровольных народных дружин.

В 1997 году Булат Шавкатович перешёл в созданный в КФТИ отдел телекоммуникационных технологий. Он участвовал в создании локальной сети института. В его обязанности входили модернизация и поддержка работы локальной сети, поддержание в рабочем состоянии программно-аппаратных комплексов АХЧ и телефонной станции КФТИ.

Булат Шавкатович и сейчас на боевом посту. С 2013 года он уже в составе группы информационной безопасности, телекоммуникационных и сетевых технологий КФТИ продолжает выполнять свои обязанности. На нём держится вся слаботочная кабельная инфраструктура нашего института. Он единственный разбирается в хитросплетениях кроссов на телефонной станции и на этажах здания института.

Б. Ш. Хамидуллин вместе со своей супругой, бывшей сотрудницей нашего института О. Концевой, воспитал и вывел в жизнь двух прекрасных сыновей. Пожелаем же Булату Шавкатовичу Хамидуллину здоровья и трудового долголетия.

Д. А. Коновалов

Халима Лутфулловна Мухтасарова. К 70-летию со дня рождения

Халима Лутфулловна Мухтасарова

Халиму Лутфулловну Мухтасарову в Казанском физико-техническом институте знают все сотрудники: нельзя избежать контакта с руководителем отдела кадров, хотя бы при приёме на работу. Но и не только поэтому. Невозможно пройти мимо таких ярких личностей, которые не только выполняют свою основную работу, но и постоянно в течение долгих лет принимают активное участие в общественной жизни института.

А начиналось всё уже достаточно давно. Молоденькая красивая девушка пришла в Казанский физико-технический институт устраиваться на работу. КФТИ, как и положено академическому институту, был на переднем фронте науки, и в нем уже тогда весьма интенсивно внедрялись методики обработки экспериментальных результатов с использованием электронно-вычислительных машин (ЭВМ). В самом начале 70-х годов КФТИ получил новое здание на углу улиц Сибирский тракт–Пионерская, и в нем для ЭВМ (по простому – “машине”) отводилась территория на двух этажах здания, а обслуживающий персонал состоял из не одного десятка человек, включая и достаточно большой контингент молоденьких барышень – операторов и инженеров ЭВМ. Таким образом, новая молодая сотрудница по фамилии Закирова стала инженером на машине. Понятно также, что молодым физикам и механикам физтеха в то время очень нравилось часто посещать машину, исправлять свои “ошибки” в программах, “перебивать” перфокарты для решения “сложных задач”. В результате таких частых корректировок и отладок программ Галка Закирова стала Халимой Лутфулловной Мухтасаровой, женой известного в институте физика-электронщика и мастера-знатока телевизионной техники.

Это весна – это Юшут!

Но и после этого Халима Мухтасарова как была, так и осталась лидером в коллективе, его “заводилой” (заводила – живой, энергичный человек, инициатор или зачинщик ч.-либо. – С. И. Ожегов). Ни одно мероприятие или “дело” в институте, затеянное молодёжью, не обходилось без её участия. Все “вылазки” молодых сотрудников за город, сплав на байдарках по рекам Татарстана, Марийским и Удмуртским рекам и озёрам проходили при её активном участии. Много сил Халима Лутфулловна вложила и в функционирование и благоустройство базы отдыха КФТИ – любимое место отдыха для многих сотрудников физтеха.

И сейчас Халима Лутфулловна по-прежнему остается очень активным членом институтской семьи, ни одно сколь значимое общественное мероприятие в КФТИ не проходит без её участия.

Можно было бы назвать её ветераном, но ветераном только по числу значимых дел для института и его сотрудников, в которых за многие годы она принимала участие в стенах КФТИ. Ветераном в древнем Риме называли солдат, отслуживших свой срок в армии, но Халима Лутфулловна продолжает и сейчас достойно трудиться, и её успехи были отмечены многочисленными наградами, грамотами и дипломами.

Сотрудники физтеха горячо поздравляют Халиму Лутфулловну с юбилеем и желают здоровья, счастья и долгих лет жизни на благо родных, близких, а также и сотрудников института.

В. Ю. Петухов

Лидия Григорьевна Матюнина. К 70-летию со дня рождения

Лидия Григорьевна Матюнина

Лидия Григорьевна пришла на работу в Казанский физико-технический институт в 1976 году, проработав на заводе ЭВМ радиомонтажницей четыре года после окончания школы. Главное воспоминание, связанное с Лидией Григорьевной, а сейчас и предмет определённой гордости, это – голубые ели, растущие перед зданием института на Пионерской. Вспоминает Яхъя Валиевич Фаттахов: “Когда я пришёл в институт в октябре 1980 года, они были высотой полтора-два метра. Наша задача – комсомольцев во главе с Лидией Григорьевной – была укрыть ели деревянными щитами от снега и желающих срубить верхушки на Новый Год перед наступлением зимы. Весной – в обратной последовательности. Сейчас эти ели высотой в четыре этажа. Они уже не нуждаются в нашей защите. А я нет-нет да и вспомню с гордостью и удовольствием, что мы укрывали эти елки в своё время. И всегда вспоминаю при этом и Лидию Григорьевну. С любовью и благодарностью. Не было бы елей на этом месте, может, поставили бы сейчас ларьки или совсем отрезали участок. Наверное, многие нынешние сотрудники и не знают, когда ставят жарким летом свои автомобили в тень этих деревьев, кого благодарить за небольшую, но свою родную аллею голубых елей. Простого, скромного человека – Лидию Григорьевну Матюнину”.

Лидия Григорьевна относилась к тем работникам, труд которых незаметен на первый взгляд. Одна из работ, которую она добросовестно выполняла – это обеспечение сотрудников института полотенцами для рук. Белые вафельные полотенца. Она их меняла периодически. Отвозила стирать в прачечную. Казалось бы – мелочь. Но это являлось одним из проявлений заботы и её, и государства о научных сотрудниках. Обеспечение спецодеждой сотрудников, уезжающих в колхозы на уборку урожая, также входило в обязанности Лидии Григорьевны.

Через некоторое время в ведение Лидии Григорьевны перешла база отдыха. Лидия Григорьевна предложила выдавать отдыхающим постельное бельё, чтобы стирать его централизованно и облегчить заезд отдыхающих, так как всё для отдыха приходилось тащить на себе. При её непосредственном участии были посажены 44 ёлочки на берегу реки Волги. Однажды сильный ветер с реки засыпал маленькие ёлочки, и их надо было откапывать.

Очень сложный период настал в 90-е годы, когда заработную плату не платили несколько месяцев и не было денег даже на чистящие и моющие средства.

Лидия Григорьевна совместно с Тамарой Анатольевной Хлебниковой, просмотрев архивы, составила списки ветеранов Великой Отечественной войны, которых приглашала в институт на День Победы. Ветеранов тогда было более 30 человек, каждого персонально приглашали, проводили чаепития в буфете институте, пели песни военных лет, давали машину тем, кому из ветеранов было трудно идти.

На субботнике. 1971 год.

Встреча с ветеранами. Слева направо: С. К. Николаева, Л. Г. Матюнина, И. У. Пирогова, Т. А. Хлебникова.

В её обязанности входило очень многое – всё и не перечислить, пожалуй.

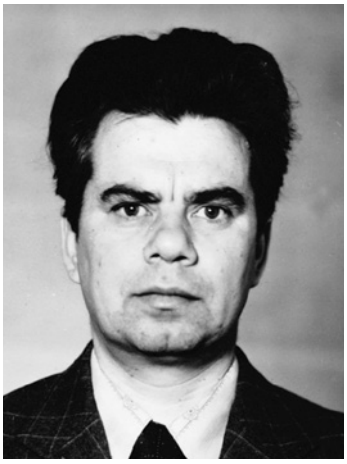
В 2000 году Лидии Григорьевна перешла на работу в урологическое отделение 15 городской больницы, где проработала более 10 лет сестрой-хозяйкой, сейчас она на пенсии. Но до сих пор она созванивается с ветеранами КФТИ, внимательно просматривает все новости про КФТИ, в котором проработала 21 год.

Глубокоуважаемая Лидия Григорьевна, поздравляем Вас с юбилеем! От всей души желаем Вам здоровья и душевного богатства.

Р. М. Ерёмина

Памяти...

Памяти Олега Файзаниевича Гатауллина. К 80-летию со дня рождения



Олег Файзаниевич Гатауллин
(10.03.1937–19.11.2016)

Непросто писать о человеке, с которым был не только в тёплых дружеских отношениях фактически всю сознательную жизнь, но и провёл бок о бок самые плодотворные годы работы.

Олег Файзаниевич Гатауллин родился 10 марта 1937 года. На базе восьми классов поступил в электротехникум связи, хорошо известное в то время в Казани образовательное учреждение, готовившее специалистов широкого профиля среднего звена. После окончания техникума получил назначение в Краснодарский край, откуда был призван на срочную службу в ряды Советской армии. В звании ефрейтора был демобилизован и вернулся в Казань.

Прежде чем войти в коллектив физиков-радиоспектроскопистов физико-технического института АН СССР, Олег Файзаниевич прошёл достаточно большой жизненный путь. Работая сменным электриком на заводе РТИ, он через два года поступает на вечернее отделение физического факультета КГУ, а затем переводится на дневное отделение. Преддипломную практику проходит в физико-техническом институте АН СССР в секторе магнитной радиоспектроскопии, которым тогда руководил член-корр. АН СССР Б. М. Козырев. Защитив диплом, Олег Файзаниевич был принят на работу в этот институт на должность инженера-оператора по эксплуатации фирменных зарубежных ЭПР-спктрометров.

Примерно с осени 1973 года я начал пробные исследования фотовозбуждённых углеводородов. Эксперимент достаточно трудоёмкий – облучение образца происходило мощным источником света при температуре жидкого азота, сигнал ЭПР был слабым, почти половина времени, отведённого по графику на эксперимент, уходила на настройку аппаратуры. Именно тогда я оценил высокую профессиональную помощь Олега Файзаниевича сначала как оператора, а затем и как вдумчивого, активного соисследователя, увлечённого и интересующегося научными изысканиями. К сожалению, в связи с реорганизацией отдельных структур института и, как следствие, перераспределением сотрудников, эта научная тема, не смотря на полученные достоверные результаты, была закрыта.

С 1975 года мы с Олегом Файзаниевичем, он в качестве соискателя, официально начали совместную работу по новой теме. Итогом этой работы явилась защита Олегом Фазайниевичем кандидатской диссертации в 1979 году. Помню, с ответом на вопросы, которые возникали при обсуждении эксперимента или результатов исследований, Олег Фазайниевич никогда не торопился. Долго и тщательно анализировал, зачастую и дома, зато на следующий день давал полный развёрнутый ответ, в однозначности которого, как я неоднократно убеждался, можно было не сомневаться. Тщательно и с любовью готовил для научных статей рисунки, которые отличались особым совершенством. Когда в ходе работы возникла необходимость, смонтировал ряд приспособлений, расширивших технические возможности стандартного ЭПР-спектрометра.

На память приходит ещё один “ненаучный” эпизод из научной жизни Олега Фазайниевича. Когда на кафедре физики энергоинститута возникла необходимость временной замены преподавателя вечернего отделения, Олег Фазайниевич, не раздумывая, согласился помочь и, как мы шутили, “профессорил” с удовольствием целый семестр.

Я могу прямо сказать, что у нас с Олегом Фазайниевичем сложился замечательный творческий союз, просуществовавший почти двадцать долгих лет до начала 90-х годов, когда по семейным обстоятельствам ему пришлось покинуть Казань.

Ю. М. Рыжманов

Пямяти Ильдуса Бариевича Хайбуллина. К 80-летию со дня рождения

Ильдус Бариевич Хайбуллин
(11.10.1937– 23.02.2007)

11 октября 2017 года исполнилось 80 лет со дня рождения Ильдуса Бариевича Хайбуллина – известного учёного и организатора науки, члена-корреспондента РАН, академика АН РТ, почётного члена многих национальных академий, лауреата Государственных премий СССР и РТ. Уже больше 10 лет как он ушёл из жизни, но воспоминания об этом ярком, деятельном и просто добром человеке до сих пор остаются в наших сердцах!

Для нас Ильдус Бариевич всегда существовал в двух ипостасях. С одной стороны, это был наш формальный и неформальный руководитель и лидер, а с другой – просто Ильдус Бариевич, который мог посоветовать, помочь в разных жизненных ситуациях и это выходило далеко за рамки служебных отношений. Во многих случаях он просто вставал стеной, чтобы защитить своих сотрудников, интересы лаборатории или научного направления. Очень аккуратно Ильдус Бариевич относился к подбору сотрудников – изначально группы ИЛУ в составе лаборатории ФТТ, а также к тематике проводимых ими исследований. В семидесятые годы ионная имплантация была молодой, во многом экспериментальной областью науки, фактически это было “непаханое” поле, и он своим удивительным научным чутьём определил направления исследований, которые и до сих пор являются актуальными и востребованными. Фактически он заложил основы нового для Казанской научной школы физиков направления – ионной имплантации. И, что очень важно, заботился о том, чтобы между нами не возникал конфликт интересов. Поэтому и в группе, и позднее, в лаборатории, между сотрудниками были всегда товарищеские отношения, которые во многом сохранились и до сих пор!

Необходимо отметить, что Ильдус Бариевич никогда не ограничивал нас какой-то конкретной тематикой. Мы были молодыми и любопытными. И это позволило обнаружить и изучить ряд важных радиационно-стимулированных эффектов, например, формирование нанопористых слоёв кремния и германия, нитрида алюминия или модификацию оптических свойств алмазоподобных плёнок, которые стали востребованными только сейчас. В отношении приоритетов Ильдус Бариевич всегда занимал принципиальные позиции.

Сейчас, оглядываясь назад и вспоминая Ильдуса Бариевича, мы можем сказать: нам крупно повезло, поскольку жизнь нас столкнула с этим замечательным человеком и учёным, и мы стали его учениками! Нужно отметить, что он воспитал и дал путёвку в жизнь целой плеяде известных учёных, своих учеников, среди которых и доктора наук и лауреаты всесоюзных, всероссийских и международных премий. Они составляют костяк созданной Ильдусом Бариевичем, общепризнанной ведущей научной школы России, которая ведёт фундаментальные и прикладные исследования в наиболее актуальной и востребованной области науки – физики наноструктур и нанотехнологий. Благодаря его усилиям и усилиям его учеников Казанский физтех является не только одним из известных центров радиоспектроскопии, но и передовым центром по физике взаимодействия высокоэнергетичных ионных пучков с веществом и применения радиационно-стимулированных процессов в области нанотехнологий.

А начиналось всё с окончания радиофака КАИ (1960 г.), когда молодые, обученные полупроводниковой технике выпускники, были направлены на предприятия “оборонки” для разработки бортовой аппаратуры. На номерном заводе (ныне “Элекон”) Ильдус Бариевич занимался разработкой телеметрической аппаратуры для космических кораблей. Полученный опыт понадобился ему при поступлении на работу в КФТИ (1966 г). В 1967 г. академиком Е. К. Завойским, работавшим в то время в Курчатовском институте атомной энергии, было предложено установить в институте ионный ускоритель, как эффективный метод введения различных примесных атомов в материалы. В 1969 г. Б. М. Козырев, в отделе которого работал Ильдус Бариевич, направляет его в аспирантуру Курчатовского института, где он занялся разработкой методов ионной имплантации для примесного легирования полупроводников. Одновременно он курировал работы по монтажу и наладке в КФТИ ускорителя ионов ИЛУ, который был запущен в 1972 г. В 1973 г. успешно защитил кандидатскую диссертацию в Москве, возвратился в институт и возглавил группу ионной имплантации, входящую в состав лаборатории физики твёрдого тела КФТИ (зав. лаб. М. М. Зарипов). Необычайные энергия и коммуникабельность Ильдуса Бариевича позволили сразу развернуть работы по исследованиям физики процессов и возможностям ионной имплантации для управления электрофизическими, оптическими, магнитными, прочностными характеристиками, структурными параметрами различных материалов, создания нанокомпозитных материалов и т.д. Ряд результатов нашли применение в промышленности Республики, например, в производстве

дифракционных решёток. Эти работы были удостоены Государственной премии РТ в 1998 г. (Хайбуллин И.Б., Файзрахманов И.А, сотрудники ГИПО).

Наиболее важные фундаментальные результаты были получены на стыке нескольких научных направлений института. В результате совместных исследований в области радиационной физики и квантовой электроники, которые проводились сотрудниками КФТИ (Хайбуллин И.Б., Зарипов М.М, Штырков Е.И., Галяутдинов М.Ф. и Баязитов Р.М.), открыто новое физическое явление импульсной ориентированной кристаллизации твёрдых тел (лазерный отжиг). Данное открытие легло в основу широко используемой в передовых центрах мира технологии импульсных обработок микроэлектронных структур и удостоено Государственной премии СССР (1988 г.).

Талант Ильдуса Бариевича как организатора различных научных направлений особо проявился на посту Главного учёного секретаря Академии наук Татарстана, где он работал в трудные для науки годы. Во многом, благодаря и его усилиям был сохранён научный потенциал Республики.

Р. М. Баязитов, И. А. Файзрахманов

Памяти Ралифа Шаймулловича Сафина. К 70-летию со дня рождения

Ралиф Шаймуллович Сафин
(06.05.1947–02.12.1997)

6 мая 2017 года исполнилось бы 70 лет кандидату физико-математических наук, старшему научному сотруднику лаборатории молекулярной спектроскопии Ралифу Шаймулловичу Сафину. Вся его трудовая деятельность была связана с Казанским физико-техническим институтом.

Ралиф Шаймуллович родился в селе Большая Атня Большеатнинского района ТАССР. После окончания средней школы с серебряной медалью поступил на физический факультет КГУ, который окончил по специальности радиофизика и электроника. С 1 сентября 1970 г. был зачислен в качестве стажёра-исследователя в отдел радиоспектроскопии КФТИ АН СССР, который возглавлял член-корреспондент АН СССР Б. М. Козырев. Отдел тогда располагал выставочным образцом спектрометра фирмы JEOL, который был поручен молодому сотруднику, и он его полностью освоил. Это, по сути, была непростая задача, потребовалось перевести с английского тома инструкций. Кроме того, прибор очень интенсивно эксплуатировался, что приводило к постепенному выходу дорогостоящих импортных деталей из строя, а интересы отдела требовали решений – и постепенно, блок за блоком в “японце” появлялись отечественные радиодетали. Десятки схем спектрометра с внесёнными изменениями были перерисованы вручную. Забегая вперёд, отмечу, что в основном благодаря тщательной и кропотливой работе Ралифа Шаймулловича по профилактике спектрометра, проведению оптимальных реконструкций и перевода на отечественную элементную базу, прибор, интенсивно эксплуатируемый с 1968 года, находился ещё в рабочем состоянии вплоть до 2008 года.

С 1972 года, уже в должности младшего научного сотрудника, Ралиф Шаймуллович совместно с Г. П. Вишневской приступил к развитию тогда совсем ещё новой области применения магнитной радиоспектроскопии – исследованиям полимерных сорбентов, а именно синтетических ионообменных смол, содержащих парамагнитные ионы переходных металлов. Сама по себе новая область исследования требовала разработки методик подготовки смол, обеспечения ЭПР измерений при разных физических и химических условиях воздействия на образцы. Большинство необходимых для проведения эксперимента приставок и устройств Ралиф Шаймуллович разрабатывал и изготавливал самостоятельно.

Р. Ш. Сафин является соавтором более 80 научных работ и монографии (совместно с Г. П. Вишневской и Л. С. Молочниковым), представляющих детальное изучение факторов, влияющих на состав, подвижность и особенности распределения комплексов переходных металлов более чем в 20 широко используемых на практике и новых ионообменных смолах с целью выработки рекомендаций для их применения. Полученные результаты были отмечены премией на конкурсе ВХО им. Менделеева. Исследования имели как научное значение для теории сорбционных процессов, так и прикладное – в связи с выработкой рекомендаций по эффективной эксплуатации и синтезу ионитов с заданными технологическими параметрами. Так, в 1980 году результаты работ были

использованы при разработке промышленной технологии очистки кобальтовых растворов от никеля и извлечения рения из промывной серной кислоты на комбинате “Североникель”, что позволило получить годовой экономический эффект сто пятьдесят пять тысяч рублей, а также на Норильском горно-металлургическом комбинате. В 1984 г. Р. Ш. Сафин успешно защитил диссертацию на соискание степени кандидата физико-математических наук по теме “Состояние ионов меди (II) и ванадила (II) в ионообменных смолах по данным ЭПР”.

Он не только активно участвовал в выполнении планов научных исследований отдела и, позднее, лаборатории, он очень любил свою работу. Ралиф Шаймуллович был открыт новым идеям, охотно помогал в проведении исследований и разработках новых экспериментальных приставок сотрудникам других институтов Казанского научного центра РАН и КГУ. Его профессионализм ценили и часто обращались за консультациями. Мне повезло общаться с Ралифом Шаймулловичем в годы моего становления как научного сотрудника – под его руководство меня определила Г. П. Вишневская, когда я только пришла в физтех стажером-исследователем. Я благодарна ему за постоянное внимание и готовность помочь, а иногда и взять на себя сложный момент в работе. Ралиф Шаймуллович многому научил меня в плане проведения экспериментов, и сейчас в своей работе я часто использую освоенные при нём методики.

Он был уравновешен, терпелив, обладал необходимым трудолюбием и оптимизмом, что позволяло ему проводить многочасовые измерения, справляться с километрами спектров, и обеспечивать многократное воспроизведение результатов. Установка всегда была в работе, всегда для неё были любые запчасти, всё в запасе, всё “разложено по полочкам”. Он был очень дотошен в мелочах, любил работать не спеша, методично, разбираться с разными механизмами. У него и хобби такое было – он чинил часы. Было для этого занятия у него все, что у часовых дел мастеров: отверточки, молоточки, линзы, очки, фонарики для очков, осветители, коробки с пружинками и шестеренками. Многие к нему с часами обращались: и физики, и биологи, и геологи, и языковеды – кому почистить, кому починить – “Пусть Ралиф посмотрит…”. На стенах висели разные ходики, часы с кукушкой, в комнате разом могли зазвонить несколько будильников, поставленных на “проверку завода”.

Ещё Ралиф Шаймуллович хорошо рисовал и умел писать тушью, что во времена отсутствия цветных принтеров и плоттеров высоко ценилось. Постеры для конференций, рисунки для статей и монографии, объявления, таблички, шаржи и поздравления – всё требовало изрядного мастерства, аккуратности и точности исполнения. Он принимал участие в разработке макета медали “Лауреат Государственной премии Республики Татарстан в области науки и техники”. В разные годы был членом редколлегии институтской стенгазеты, оформительской группы профкома института и комиссии по наглядной агитации. Надо отметить, что Ралиф Шаймуллович и

На празднике.

в этой области старался расти профессионально: интересовался творчеством художников-графиков и собирал оригинальные рисунки – вырезки из газет, журналов, открыток.

Р. Ш. Сафин хорошо знал родной татарский язык и его творческая натура проявилась ещё одной гранью – он длительное время сотрудничал с книжным издательством – занимался переводами учебно-методической литературы на татарский язык. Особенно он гордился переводом школьного учебника математики.

С 1992 года Р. Ш. Сафин был утверждён в должности старшего научного сотрудника лаборатории МРС. Будучи членом исполнительного комитета XVII Конгресса AMPERE внёс заметный вклад в его проведение, принимал активное участие в мероприятиях по вручению международной премии им. Е. К. Завойского в 1994–95 гг. В декабре 1995 г. ему было присвоено учёное звание Старший научный сотрудник по специальности 01.04.15 – молекулярная физика.

Научная и общественная деятельность Р. Ш. Сафина были отмечены Почётной грамотой Президиума АН СССР, Почётной грамотой Президиума КНЦ РАН, Почётным дипломом КФТИ КНЦ РАН, имел благодарности дирекции института, был занесён на Доску Почёта КФТИ.

Ралиф Шаймуллович умел расположить людей к себе и найти с ними общий язык. Он переживал, если в процессе работы возникали конфликты, старался уладить их с наименьшими потерями для всех сторон. Сотрудники часто к нему приходили и с проблемами, и с радостями, для всех у него находились доброе слово или шутка. Наверное, поэтому он многие годы был профоргом лаборатории, и за эту работу был отмечен нагрудными знаками Всесоюзного центрального совета

профессиональных союзов (ВЦСПС) “Победитель соц. Соревнования” и “За активную работу в профгруппе”.

С самого прихода в институт ещё одному увлечению отдавал Ралиф Шаймуллович своё свободное время – играл в настольный теннис. По воспоминаниям коллег, знавших Р. Ш. Сафина: “Приятельские отношения с Ралифом сразу налаживались, всегда были друг другу рады. В то время в здании на Лобачевского стоял теннисный стол – все приходили играть, и мы, и геологи, и биологи. Играли одиночно и парно, соревнования устраивали между институтами – бурная спортивная жизнь тогда была – и Ралиф был её постоянный участник. Для многих он стал одним из первых учителей настольного тенниса. Чуть ли не каждый день – в обед, а иногда и после работы. В те времена работали так: приходили с утра, а уходили вечером в одиннадцать, бывало, что и на ночь оставались, молодые аспиранты горели тогда желанием “науку двигать”. Иногда уже, когда надоедало у установки стоять или писаниной заниматься – выходили шарик побросать. С ним было безумно интересно в теннис играть – хитрющий! От него в игре можно было ожидать всё что угодно, с ним не просто технично, “вкусно” играть было! Что подложит в очередной раз? Нестандартные решения в игре у него были постоянно и ожидаемо неожиданные! Этому у него учились – выкладывали потом внезапно другим соперникам. Сам очень спокойный был. Ходил не спеша, вразвалочку, эдакий “хузя”. Надёжный, все свои дела от “А” до “Я” делал, капитально. Очень спокойный такой. Он ко всем добрый был. От него никто не слышал ни одного резкого слова, ни в чей адрес. Умел он свою эмоциональность так сдерживать, никогда не выплёскивал, но всегда сопереживал. Всё через себя пропускал, он был миротворец, громоотвод, спокойный, рассудительный, “мужик” в хорошем смысле слова”.

Первый раз сердце “защипало” перед защитой кандидатской, как позже выяснилось – была серия микроинфарктов. Очередной инфаркт Ралифу Шаймулловичу пережить не удалось.

Ралиф Шаймуллович вырос в дружной семье, с братом и двумя сёстрами. Возможно, именно в родительском доме он получил заряд жизнелюбия и оптимизма, научился уважать и беречь близких людей. Трепетное отношение к родительской семье он сохранял всегда, и к своей семье, жене и двум детям, относился со всем вниманием и любовью.

Прошло уже 20 лет со дня смерти Ралифа Шаймулловича Сафина, а знавшие его люди продолжают вспоминать его с теплотой.

P.S. Хузя – это диалектный вариант имени Ходжа, которое с древнеиранского переводится как “господин, наставник”, а в персидском имеет множество значений: хозяин, учитель и т.д. Ходжа – почётный титул духовных лиц, состоятельных чиновников, феодалов, в некоторых случаях – поэтов и писателей.

Е. Н. Фролова

Памяти Альбины Кузьминичны Московской. К 70-летию со дня рождения

Московская Альбина Кузьминична (05.11.1947–17.03.2013)

В этом году бывшей сотруднице нашего института Московской Альбине Кузминичне исполнилось бы 70 лет.

Альбина Кузминична родилась 5 ноября 1947 года в городе Апшеронске Краснодарского края в семье военнослужащего. После окончания средней школы в 1965 году поступила учиться во Львовский госуниверситет, на филологический факультет. В 1968 году вследствие тяжёлой болезни матери вынуждена была уйти из университета и с 1968 по 1970 год ухаживала за больной матерью. С 1970 по 1971 год работала на лесозаводе города Апшеронска. В 1971 году приехала в город Казань для поступления в Казанский университет, но, не пройдя по конкурсу, поступила на работу на должность лаборантки в радиоастрономическую лабораторию КГУ, а в октябре 1971 года была принята на должность заведующей канцелярией Казанского физико-технического института АН СССР и проработала у нас почти 20 лет.

Альбина Кузминична безупречно владела методами делопроизводства и основами архивного дела, к своим обязанностям относилась добросовестно, была ответственна до щепетильности. Обладая феноменальной профессиональной памятью и широкими знаниями, она оказывала консультативную помощь сотрудникам института. Коллеги обращались к ней за помощью по

многим вопросам – юридическим, бытовым, по оформлению различных документов, и т.д. и всегда получали квалифицированные советы. Своей начитанностью и широким кругозором удивляла многих, и не было темы, на которую она не смогла бы говорить.

Альбина Кузминична была очень коммуникабельной и общительной, её знали практически все сотрудники не только нашего института, но и сотрудники институтов АН СССР г. Казани и университета. Альбина Кузминична постоянно участвовала в общественной жизни института, в основном по профсоюзной линии. Обладала обострённым чувством социальной справедливости и, работая в профкоме института, помогала многим сотрудникам. За безупречную работу и большую общественную деятельность имела много благодарностей. В 1990 году она уволилась из института, но постоянно поддерживала связь со многими сотрудниками до конца жизни.

В марте 2013 года, на 66-ом году жизни, неожиданно оборвалась жизнь Альбины Кузминичны Московской. Светлая память о хорошем, добром человеке навсегда останется с нами.

Х. Л. Мухтасарова

Памяти Евгения Петровича Жеглова

Евгений Петрович Жеглов
(22.05.1937–23.03.1017)

Евгений Петрович Жеглов родился в г. Казани 22 мая 1947 г. После окончания средней школы № 114 он поступил на физический факультет Казанского университета, который закончил в 1971 году, и по распределению уехал работать в Горьковскую область на радиозавод. Но душа настоящего физика-экспериментатора всегда рвалась к научным исследованиям, и в марте 1976 года он вернулся в Казань, где и был принят на работу в Казанский физико-технический институт на должность старшего инженера в лабораторию ЭПР.

Евгений Петрович – типичный представитель людей из советского социализма (в хорошем смысле этого словосочетания). Для него слово “наше” было значительно более весомее слова “моё”. Это очень чётко выражалось в его отношении к работе, а конкретно к прибору – ЭПР-спектрометру фирмы “Varian”. В то время это был лучший спектрометр не только в институте, но и во всей Казани – городе, в котором родилась ЭПР-спектроскопия, и где знали цену хорошим спектрометрам магнитного резонанса. В бытность его “начальником установки Varian” прибор работал “как часы”, благодаря жизненному кредо Евгения Петровича: “Первым делом – самолеты”. При этом все регламентные работы проводились в указанные сроки, он не допускал нарушений, вызывающих возникновение экстремальных ситуаций или работу в режимах, не предусмотренных инструкциями. В то же время он успешно занимался и модернизацией экспериментальных установок. Вспоминается показательный случай, когда срочно (как у нас это бывает весьма часто) было необходимо отремонтировать и модернизировать блок для ЭПР-спектрометра, разработанного и изготовленного в Минске. Его нужно было доставить в фирму-изготовитель уже “завтра“. Евгений Петрович безоговорочно побежал за билетами на поезд (с пересадкой в Москве с разных вокзалов). С транспортировкой блока было бы не слишком сложно, поскольку поехали всё же вдвоём, если бы блок не весил почти центнер, а у Евгения Петровича не болела бы в то время спина (об этом он сказать “забыл”). Но это задание, как всегда, было выполнено быстро и качественно.

После защиты диссертации и в связи с “очередными модернизациями” в научной сфере Евгений Петрович решил заняться преподавательской деятельностью и ушёл из института в Казанский государственный энергетический университет. Но он откликнулся на просьбу друзей и вернулся в любимый физтех, хотя лишь на долю ставки, для продолжения экспериментальных исследований, но уже в новой для него области – для проведения ЭПР-исследований в биологических объектах. К сожалению, эта его работа осталась незаконченной.

В последнее время Евгений Петрович тяжело болел, и летом 2017 года его не стало. Но добрая память о нём останется в наших сердцах, и не только его друзей, но и в сердцах тех, кто его знал просто как хорошего человека и надёжного товарища.

В. Ю. Петухов

НАУЧНО-ОРГАНИЗАЦИОННАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ

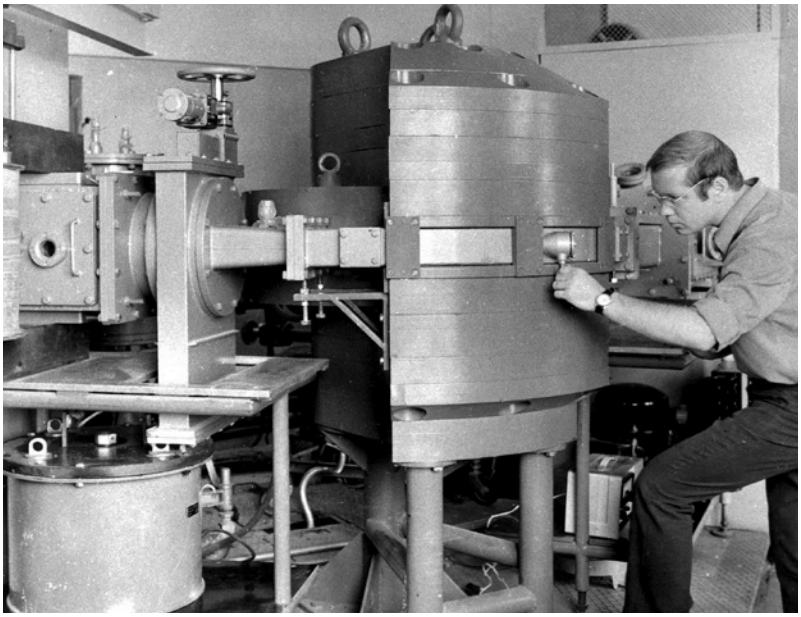
Ионная имплантация. От открытия физического явления до передовых технологий

В июне 2017 г. исполнилось 45 лет с момента запуска ионно-лучевого ускорителя ИЛУ. А начиналось всё по инициативе Е. К. Завойского, работавшего в то время в Институте атомной энергии им. И. В. Курчатова (ИАЭ), который предложил использовать в нашем институте для введения примесей в материалы ионную имплантацию (бомбардировку высокоэнергетичными ионами). Этот ускоритель, как крупный масс-спектрометр, был разработан в ИАЭ и использовался там для разделения и получения радиоактивных изотопов. Однако в конце 60-х выяснилось, что ионная имплантация является также эффективным методом легирования полупроводников (взамен диффузии) благодаря возможности управления глубиной залегания примеси, её концентрацией, локальностью легирования, необходимых в производстве микросхем.

Во всем мире начались разработки ионных ускорителей (имплантеров), производство ИЛУ было быстро передано на завод “Балтиец” в г. Нарва и первые установки (наша № 6) сразу пошли в советскую микроэлектронику (НПО “Микрон”, г. Зеленоград). Ускоритель был доставлен в Казань в 1970 г. отдельным вагоном и до заселения нового здания (на ул. Сибирский тракт) находился в ящиках в разных местах (в здании на ул. Лобачевского, в гараже и др.). Ионная имплантация стала новым направлением деятельности института и поэтому для изучения возможностей имплантации в целевую аспирантуру ИАЭ был направлен Хайбуллин И.Б., а я в 1971 г. был приглашён в институт для монтажа и запуска ИЛУ.

Несмотря на большую работу по монтажу и отсутствие многих комплектующих (вакуумных насосов, сильноточного генератора питания магнита сепаратора и др.) в 1972 г. на укорителе был получен первый пучок (ионов фосфора).

В дальнейшем нами был изготовлен целый парк новых ионных источников, которые позволяли получать очень широкий спектр ионов, начиная с водорода, и кончая такими тяжёлыми ионами как серебро и золото. После защиты кандидатской диссертации в Москве (1973 г.) И. Б. Хайбуллин вернулся в КФТИ и создал группу ионной имплантации в составе лаборатории физики твёрдого тела (зав. лаб. Зарипов М.М.). После запуска ИЛУ сразу начались работы по апробации метода для управления оптическими и электрическими свойствами полупроводников, а также по поиску новых



Запуск ионного ускорителя ИЛУ (1972 г.). Р. М. Баязитов возле масс-сепаратора при настройке ионного источника.

Лауреаты государственной премии СССР перед пультом управления ускорителя ИЛУ (1989 г.). Слева направо: Хайбуллин И.Б., Штырков Е.И., Галяутдинов М.Ф., Зарипов М.М., Баязитов Р.М.

практических применений в голографии, создании дифракционных решёток и др.

Взаимодействие с оптической группой (руководитель – Штырков Е.И.) показало, что лазерное воздействие на имплантированный кремний приводит к изменению оптических свойств, что может быть использовано для записи голограмм. Более того, оказалось, что импульсная лазерная обработка приводит к значительно большей электропроводности, чем традиционная термическая обработка. За предложенный способ легирования полупроводников в 1974–1975 г. было получено свидетельство на изобретение СССР № 504435. Первые наши публикации по импульсному лазерному отжигу послужили бурному развитию этого направления, как в СССР, так и во всём мире. Было установлено, что быстрая кристаллизация (особенно в наносекундном жидкофазном режиме) позволяет многократно повысить предельную растворимость примесей в кристаллах, эффективно устранять дефекты кристаллической решетки, проводить локальную обработку, создавать новые соединения, приводить к эпитаксиальному росту покрытий.

Результаты быстрых обработок в корне меняли существующие представления о росте кристаллов. В 1988 г. за “Открытие явления импульсной ориентированной кристаллизации твёрдых тел (лазерный отжиг)” коллективу авторов (Хайбуллин И.Б., Штырков Е.И., Зарипов М.М., Галяутдинов М.Ф., Баязитов Р.М.) совместно с коллегами из академических институтов страны была присуждена Государственная премия СССР.

Технологическое применение метода с использованием импульсных световых обработок наряду с ионной имплантацией нашло широкое использование в современной микроэлектронике. “За вклад в технологию лазерного отжига” сотрудники института (Хайбуллин И.Б. (посм.), Баязитов Р.М., Баталов Р.И., Галяутдинов М.Ф. и Фаттахов Я.В.) были удостоены Премии IEEE им. Дж. Гиббонса (2009 г., США). Открытие явления лазерного отжига и его широкое технологическое применение являются достижениями, которыми наш институт может гордиться!

Вклад нашего института отмечен также в Большой Российской энциклопедии в обширной статье, написанной мною по приглашению редакции, под широко используемым термином “Лазерный отжиг”.

После запуска ИЛУ развитие получили и другие направления ионной имплантации – по созданию новых тонкоплёночных магнитных материалов (Петухов В.Ю.), а также по модификации узкозонных полупроводников (Ибрагимова М.И.) и оптических покрытий (Файзрахманов И.А.) (эти направления развивались совместно с ГИПО). Было показано, что воздействие ионных пучков значительно повышает адгезию тонкоплёночных покрытий к материалам, что позволило резко повысить количество производимых дифракционных решёток. Воздействие ионных пучков позволило управлять профилем штрихов дифракционных решёток, что повышало разрешение и чувствительность оптических приборов. Эти исследования и их промышленное внедрение в 1998 г. были удостоены Государственной премии РТ (Хайбуллин И.Б., Файзрахманов И.А. с сотрудниками ГИПО).

На стыке двух фундаментальных дисциплин – геологии и физики были проведены исследования по влиянию имплантации ионов на физико-химических свойства различных минералов (оксидов, силикатов, а также алмазов природного и искусственного происхождения). Получены

Н.с. Валеев В.Ф. за пультом управления ИЛУ.

С.н.с Нуждин В.И. при разработке деталей ускорителя ИЛУ.

новые знания о природе и физических механизмах возникновения центров окраски в минералах при радиационном воздействии ионными пучками с высокой энергией. Синтезированы новые материалы с повышенными потребительскими качествами – аналоги сапфира, рубина, изумруда и других ювелирно-поделочных самоцветных камней. Получены бриллианты с высоко декоративной жёлтой и чёрной фантазийной окраской. Результаты научных исследований по разработке ионно-лучевой технологии облагораживания минералов прошли опытно-промышленную проверку на ювелирных предприятиях РФ и РТ и получили высокую оценку на Международных и Российских форумах по нанотехнологиям и инновациям. Эти работы в 2011 г. удостоены Государственной премии РТ (Хайбуллин Р.И., Нуждин В.И. с сотрудниками геологического факультета КФУ).

К настоящему времени благодаря большим работам по модернизации (Нуждин В.И., Валеев В.Ф.), ускоритель ИЛУ имеет необходимые возможности и ресурсы для проведения исследований по ионно-лучевой модификации и синтезу новых материалов и структур, а казанский физтех является одним из ведущих центров по физике взаимодействия высокоэнергетичных ионных пучков с материалами.

Р. М. Баязитов

О работе Учёного совета КФТИ КазНЦ РАН

2017 год был для всех нас особенный. В конце года Институт в том виде, в каком он был создан и развивался 70 лет, прекратил свое существование. Соответственно и Учёный совет Института прекратил своё существование, но его полномочия были продлены до выборов нового Учёного совета приказом ФИЦ КазНЦ РАН. Так что весь 2017 год мы продолжали работать в обычном режиме, если не считать, что часть заседаний была посвящена именно вопросам образования ФИЦ. Всего в 2017 году состоялось 37 заседаний Учёного совета, основная часть которых обсуждала традиционные для Учёного совета КФТИ вопросы. Согласно Уставу, по которому Институт жил все последние десятилетия, Учёный совет решал основные научные, научно-организационные и кадровые вопросы. Больше всего учёных волнуют научные направления, по которым институт будет развиваться, планы исследования. Эти вопросы были предметами обсуждения на специальных заседаниях, также затрагивались и при рассмотрении результатов научных исследований сотрудников. На заседаниях Учёного совета было представлено более 40 научных докладов, некоторые из которых вызвали бурное обсуждение. Прежде всего отмечу, что в это число вошли выступления молодых сотрудников В. Воробьёвой, Д. Бизяева, А. Леонтьева и Д. Жаркова по материалам подготовленных диссертаций. Все работы были единогласно одобрены и рекомендованы к представлению в диссертационные советы. Д. Бизяев, В. Воробьёва и А. Леонтьев уже успешно защитили свои диссертационные работы. Интересные доклады были представлены молодыми сотрудниками и на конкурсах, которые традиционно проводит физтех: конкурс на именные стипендии и на гранты КФТИ. Стипендия им. Б. М. Козырева в 2017 году была присуждена Дмитрию Акатьеву, который представил проект “Макет однофотонного источника света на основе спонтанного параметрическогорассеяния света при низкой температуре”.

Большая часть научных выступлений была сделана по статьям, подготовленным сотрудниками к печати или уже опубликованным. Были представлены и обзорные доклады. Например, А. А. Бухараев от имени коллектива авторов представил доклад “Стрейнтроника – новое направление микро-, наноэлектроники и науки о материалах”. Как всегда блестяще представил доклад В. Е. Катаев. В этом году его выступление было посвящено необычным магнитным свойствам alpha-$RuCl_3$.

В апреле Р. Ф. Мамин и А. А. Калачёв представили информацию о финансовой деятельности КФТИ в 2016 году.

Традиционно на Учёном совете рассматривались вопросы о выдвижении молодых учёных на соискание молодёжной премии им. Е. К. Завойского, аспирантов на соискание стипендии Президента РФ. Лауреатом молодёжной премии им. Е. К. Завойского стал сотрудник КФТИ А. Камашев. Учёный совет как всегда утверждал

планы работ аспирантов 1 года обучения, вернее одного аспиранта, так как в этом году было одно место в аспирантуру, вручил премию им. М. Л. Блата, заслушивал отчёты о загранкомандировках.

Учёный совет рассмотрел и поддержал предложения администраци об изменении структуры института, в результате которого образовалось два новых отдела: отдел когерентной и нелинейной оптики и отдел физики перспективных материалов.

22 ноября 2017 года вышел приказ о создании обособленных структурных подразделений ФИЦ КазНЦ РАН и планы научно-исследований КФТИ на 2018–2020 года Учёный совет утверждал в рамках плана Федерального исследовательского центра "КазНЦ РАН". Согласно этому плану КФТИ будет проводить исследования по государственной программе № 14 по двум темам:

1. Создание интеллектуальных систем и функциональных материалов для нано- и биотехнологий, элементной базы наноэлектроники и оптоэлектроники, устройств преобразования и хранения энергии. Диагностика дисперсных систем, наночастиц и материалов, включая наноматериалы. Совместно с ИОФХ КазНЦ РАН. Руководитель от КФТИ А. А. Бухараев, д.ф.-м.н., проф.
2. Развитие спиновой физики, спиновой химии и спиновой технологии. Спинтроника сверхпроводящих и магнитных топологических систем. Разработка физических принципов квантовой информатики. Когерентная и нелинейная оптика. Руководитель: А. А. Калачёв, д.ф.-м.н., проф. РАН

В планы включены также работы по 10 проектам в рамках программы Президиума РАН.

В конце года, как всегда, на Учёном совете обсуждались важнейшие результаты за 2017 год, затем два заседания обсуждались отчёты по темам госзадания. Для утверждения отчёты были представлены в ФИЦ КазНЦ РАН.

Нарушая хронологию, вернусь к началу года, чтобы закончить на положительных событиях. 8 февраля в День науки прошло торжественное заседание, посвящённое дню КФТИ. Это была 71-я годовщина КФТИ. На заседании подвели итоги конкуса работ 2017 года. Победителем конкурса стала работа В. Ф. Тарасова, Н. К. Соловарова и Е. В. Жарикова "Эффект Ханле в субмиллиметровой ЭПР спектроскопии примесных ионов тулия в синтетическом форстерите". Второе место заняла работа А. А. Калачёва с соавторами "Квантовая память в изотопически чистом примесном кристалле $YLiF_4$:Nd_3". Затем выступил Р. М. Баязитов с докладом "От станка – к ИЛУ, от ИЛУ – к открытию лазерного отжига". В докладе Рустем Махмутович через свою трудовую биографию представил важную страницу истории института. Ещё один юбиляр, А. М. Шегеда, прочитал свои стихи о новых возможностях фотонного эха.

В заключении заседания А. А. Калачёв вручил Благодарственные письма КФТИ за большой вклад в развитие института Р. М. Баязитову, Г. П. Вишневской, И. А. Гарифуллину, В. Н. Лисину, В. С. Лобкову, К. М. Салихову, Г. Б. Тейтельбауму, И. В. Овчинникову и А. М. Шегеде.

В. К. Воронкова

Международная конференция по лазерной физике (LPHYS 2017)

17–21 июля 2017 года в Казани прошла 26-я ежегодная международная конференция по лазерной физике (26th Annual International Laser Physics Workshop). Конференция LPHYS, проводимая ежегодно с 1991 года, является одним из крупнейших международных научных форумов для учёных и специалистов, активно работающих в различных областях науки, связанных с лазерной физикой: нелинейная оптика, оптическая спектроскопия, квантовая информатика, волоконная оптика, холодные атомы, биомедицинские исследования. На этот раз в отеле "Корстон" собрались 268 учёных, из которых 124 из России, а остальные – иностранные участники из Германии, США, Франции, Китая, Италии, Японии, Израиля – всего 21 страна. Конференция проводилась при поддержке Правительства РТ и Российского фонда фундаментальных исследований. Непосредственным организатором мероприятия был КФТИ КазНЦ РАН, партнёром которого выступило ООО "АИТ "ПЕРСОНА ГРАТА".

Программа конференции включала в себя семь пленарных заседаний, заседания специализированных секций (семинаров) и стендовую сессию, на которых, соответственно, было сделано 6 пленарных, 263 устных и 54 стендовых доклада.

На пленарных заседаниях научные сообщения представили ведущие специалисты в области лазерной физики. Проф. М. Скалли (Техасский A&M Университет, Колледж Стейшн, США) рассказал о развитии квантовой теории лазера, проф. С. Немировский (Институт теплофизики СО РАН, Новосибирск, Россия) сделал доклад на тему статистической динамики вихрей в турбулентных системах, проф. Б. Энглерт (Центр квантовых технологий, Сингапур, Сингапур) представил обзор современных подходов к оценкам квантовых состояний. Доклад проф. С. Цорцакиса (Институт электронных структур и лазеров, Гераклион, Греция) был посвящён структурированным лазерным и терагерцовым пучкам, а доклад проф. С. Моисеева

(КНИТУ-КАИ, Казань, Россия) – разработкам в области квантовой памяти на основе фотонного эха, и, наконец, проф. Д. Чараламбидис (Университет Крита, Гераклион, Греция) рассказал о разработках и приложениях источников излучения и частиц на основе облучения мишеней мощным лазерным излучением. Отдельная пленарная сессия была посвящена церемонии награждения медалями оптического общества им. Д. С. Рождественского.

На семинаре “Современные тенденции лазерной физики” были представлены доклады, посвящённые актуальным проблемам физики источников когерентного излучения различных спектральных диапазонов, когерентным и нелинейным оптическим эффектам, возникающим при взаимодействии резонансных атомных систем с лазерным излучением, методам оптической обработки информации. Большой интерес вызвали доклады А. М. Желтикова (МГУ, Москва, Россия; РКЦ, Москва, Россия; Техасский A&M Университет, Колледж Стейшн, США) по оптическим солитонам в воздухе, Ф. Хеммера (Техасский A&M Университет, Колледж Стейшн, США) по биологическим сенсорам на основе наноалмазов, К. Хакута (Университет электрокоммуникаций, Токио, Япония) по квантовой электродинамике в системах на основе оптического нановолокна, В. Шалаева (Университет Пердью, Уэст-Лафейетт, США) по плазмонным метаматериалам.

Семинар “Сильные поля и аттосекундная физика” включал доклады, отражающие современное состояние исследований в области генерации оптических гармоник высокого порядка, физики взаимодействия атомов с мощным лазерным излучением, а также исследований, связанных с разработкой и применением аттосекундных лазеров. Среди приглашённых можно отметить доклады Г. Паулюса (Институт Оптики и квантовой электроники, Йена, Германия) по УФ когерентной томографии с наноразрешением, У. Тумма (Университет Канзаса, США) по время-разрешенной фотоэмиссии с поверхностей и наночастиц, А. М. Попова (МГУ, Москва, Россия) по генерации чётных и нечётных гармоник атомом в мощном лазерном поле, Н. Камуса (Институт Макса Планка ядерной физики, Гейдельберг, Германия) по экспериментальному обнаружению времени туннелирования Вигнера, К. Кейтеля (Институт Макса Планка ядерной физики, Гейдельберг, Германия) по релятивистской квантовой электродинамике со сверхмощными лазерными полями.

Доклады, посвящённые оптическим методам исследования биологических объектов и вопросам применения лазеров в медицине, были представлены на семинаре “Лазерные биомедицинские приложения”. Особый интерес слушателей вызвали доклады Р. Есеналиева (Техасский медицинский университет, Галвестон, США) по лазерной оптоакустической диагностике и Г. Бастианелли (Университет Павии, Павия, Италия) по применению лазеров в оториноларингологии.

Семинар “Физика лазеров” был посвящён актуальным направлениям разработок мощных лазеров, волоконных лазеров и усилителей, методам измерения параметров сверхкоротких лазерных импульсов. Особо можно выделить приглашённый доклад Н. Давидсон (Институт Вейцманна, Реховот, Израиль) по лазерам с цифровыми резонаторами.

Современное состояние исследований в области генерации терагерцового излучения, лазерной филаментации, оптических солитонов обсуждалось на семинаре “Нелинейная оптика и оптическая спектроскопия”. Большой интерес вызвали доклады А. Музуровица (Высшая национальная школа передовых технологий, Палезо, Франция) по долгоживущим электрическим разрядам в воздухе, вызванным филаментацией, Т.-Ж. Ванга (Шанхайский институт оптики и точной механики, Китай) по лазерно-индуцированным коронным разрядам, О. Косаревой (МГУ, Москва, Россия) по влиянию чирпирования на генерацию ТГЦ излучения двухцветным фемтосекундным филаментом, Ж. Джу (Шанхайский институт оптики и точной механики, Китай) по временной эволюции лазерно-индуцированной конденсации воды, Я. Ли (Тяньцзинский университет, Тяньцзинь, Китай) по эффективной генерации дисперсионных волн в новых фотонно-кристаллических волокнах.

На семинаре “Физика холодных атомов” были представлены доклады, посвящённые физике коррелированных квантовых систем, таких как бозе-эйнштейновский конденсат и квантовые жидкости, а также ридберговским атомам. Здесь хотелось бы отметить доклады М. Баранова (Университет Инсбрука, Инсбрук, Австрия) по наномасштабным оптическим потенциалам для холодных атомов, В. Багнато (Университет Сан Пауло, Бразилия) по распределениям импульса и энергии в турбулентной супержидкости, К. Саша (Ягеллонский университет, Краков, Польша) по временным кристаллам, возникающим благодаря самоорганизации многоатомной системы во времени.

На семинаре “Квантовая информатика” обсуждались актуальные направления исследований в области квантовых оптических технологий, такие как разработка источников неклассических состояний света, квантовой памяти, однофотонных детекторов, а также последние достижения в области квантовой связи, квантовых вычислений и квантовой метрологии. Были представлены приглашённые доклады Л. Санчеса-Сото (Институт света Макса Планка, Эрланген, Германия) по достижению предельного квантового разрешения, М. В. Чеховой (Институт света Макса Планка, Эрланген, Германия) по сверхширокополосным коррелированным пучкам света и их частотному преобразованию, М. Женовьезе (Национальный институт метрологии, Турин, Италия) по защищённым квантовым измерениям, М. Фёдорова (ИОФ РАН, Москва, Россия) по поляризационным свойствам фотонов, испускаемых с режиме неколлинеарного спонтанного параметрического рассеяния, А. Сергиенко (Университет Бостона, США) по квантовым симуляциям физических систем с использованием линейных оптических многополюсников, С. Страупе (МГУ, Москва, Россия) по генерации пространственных состояний Белла без постселекции.

Темой семинара “Волоконная оптика” явилось современное состояние исследований, связанных с разработкой волоконных лазеров и усилителей. Следует отметить приглашённые доклады Р. Нигматуллина (КНИТУ КАИ, Казань, Россия) по методам извлечения информации из шума и В. Бурдина (Поволжский университет телекоммуникаций и информатики, Самара, Россия) по динамике нелинейных возбуждений мод высокого порядка в одномодовом оптическом волокне.

Тематика семинара “Экстремальные оптические технологии” охватывала актуальные вопросы квантовой электродинамики, исследования квантовых процессов в интенсивном лазерном поле, исследования в области лабораторной астрофизики. Среди приглашённых можно отметить доклады А. Гоноскова (Технический университет Чалмерса, Гётеборг, Швеция) по перспективам беззеркальной генерации рентгеновского излучения при взаимодействии лазерного излучения с плазмой, Г. Паулюса (Институт Оптики и квантовой электроники, Йена, Германия) по рентгеновским поляриметрам на основе алмаза для детектирования двулучепреломления вакуума и Х. Бауке (Институт ядерной физики Макса Планка, Гейдельберг, Германия) по спиновым эффектам и реакции излучения для электронов в сильных электромагнитных полях.

В целом, Международная конференция по лазерной физике LPHYS 2017 прошла на высоком научном уровне. Оценивая по итогам работы конференции уровень работ российских учёных, можно сказать, что представленные ими результаты соответствуют современным тенденциям развития научных исследований в различных областях лазерной физики, среди которых особое место занимают физика лазеров, нелинейная оптика и оптическая спектроскопия, волоконная оптика и квантовая оптика и информатика.

В заключение хочу поблагодарить сотрудников института, которые активно принимали участие в подготовке и проведении конференции LPHYS’17 в составе локального организационного комитета: Д. О. Акатьева, Д. К. Жаркова, Н. Г. Куркину, И. З. Латыпова, А. В. Леонтьева, Т. Г. Митрофанову, Л. В. Мосину, Д. А. Турайханова, И. Н. Чуприну, А. В. Шкаликова, А. Г. Шмелёва, А. А. Шухина. Также хотелось бы выразить признательность генеральному директору ООО “АИТ “ПЕРСОНА ГРАТА” Р. З. Мифтахову и всей его команде за позитивный настрой и безупречную организацию конференции.

А. А. Калачёв

XXI Всероссийская конференция по физике сегнетоэлектриков (ВКС-XXI) и Международный семинар “Фазовые переходы и неоднородные состояния в оксидах”

XXI Всероссийская конференция по физике сегнетоэлектриков (ВКС-XXI) и Международный семинар “Фазовые переходы и неоднородные состояния в оксидах” проходили в Казани 26–30 июля 2017 года. Международный семинар “Фазовые переходы и неоднородные состояния в оксидах” является междисциплинарным мероприятием, включающим следующие разделы физики конденсированного состояния: физика сегнетоэлектриков и диэлектриков; физика магнитных явлений; приповерхностные свойства – атомная силовая микроскопия. Конференция ВКС-XXI является мероприятием с большими традициями, берущими своё начало из 50-х годов XX века. Предшествующие прошедшей в Казани конференции были организованы в Санкт-Петербурге (2008), Москве (2011) и Красноярске (2014). Основной целью проведённой в Казани конференции был обмен новыми результатами, достижениями и опытом между ведущими исследователями Российской Федерации и ряда стран ближнего зарубежья в области физики сегнетоэлектриков. Фундаментальные научные проблемы, решение которых обсуждалось на ВКС-XXI, лежали в широких пределах, описываемых тематиками секций:

1. Фазовые переходы, критические явления.
2. Теоретические расчёты свойств сегнетоэлектриков.
3. Структура и динамика кристаллической решетки.
4. Физические свойства сегнетоэлектриков (монокристаллы, керамика, композиты, жидкие кристаллы, новые материалы).
5. Сегнетоэлектрики-релаксоры.
6. Мультиферроики.
7. Доменная структура и процессы переключения.
8. Сегнетоэлектрические плёнки, сверхрешётки и наноструктуры. Размерные эффекты в сегнетоэлектриках.
9. Спектроскопические исследования сегнетоэлектриков и диэлектриков.
10. Практическое применение сегнетоэлектриков и родственных материалов (пиро- и пьезоэлектрические, оптические и нелинейно- оптические, СВЧ).

Таким образом, обсуждаемые на конференции проблемы принадлежали как традиционным направлениям исследований сегнетоэлектриков (секции 1–5), так и бурно развивающимся областям физики мультиферроиков, физики и технологии доменных стенок и структур в объёмных системах, а также специфики наноструктури-

рованных объектов – наночастиц, тонких плёнок, гетероструктур. Обсуждались и чисто практические аспекты, связанные с многообразными применениями сегнетоэлектриков. Спектр исследований, результаты которых докладывались и обсуждались на конференции, перекрывал тематики большинства инициативных проектов, выделенных РФФИ в последние годы по направлению "Сегнетоэлектрики и диэлектрики". Из представленных на конференции докладов хотелось бы отметить те, которые наиболее полно отражают существующие тенденции в физике диэлектриков и сегнетоэлектриков. Так, доклад А. С. Сигова "Справедливость теоремы Имри и Ма в системах с дефектами типа "случайное локальное поле" был посвящён актуальной проблеме влияния дефектов на состояние системы. Обстоятельным образом обсуждались условия, в которых наличие дефектов приводит к формированию неоднородного состояния, сопряженного с разрушением в ней дальнего порядка. В докладе В. М. Мухортова "Гетероструктуры на основе наноразмерных сегнетоэлектрических плёнок: получение, свойства, применение" был представлен обзор перспектив разнообразных практических применений сегнетоэлектрических тонких плёнок и гетероструктур на их основе. Были описаны проблемы синтеза наиболее перспективных тонкоплёночных объектов, направления их решения. Обсуждались вопросы состава, структуры и формирования функциональных гетероструктур, включающих сегнетоэлектрические слои. Доклад В. П. Сахненко на тему "Катионное упорядочение в перовскитах: что? где? когда?" был посвящён влиянию катионного упорядочения на сегнетоэлектрические, магнитные и магнитоэлектрические свойства сложных оксидов семейства перовскита. Обсуждались фазовые переходы, связанные с катионным упорядочением и кристаллографические параметры упорядочивающихся соединений. Было показано, что явление катионного упорядочение в значительной степени определяет свойства соединений $PbSc_{1/2}Ta_{1/2}O_3$, $PbIn_{1/2}Nb_{1/2}O_3$, $SrFe_{1/2}Mo_{1/2}O_3$ и других. Тема доклада Вахрушева С.Б. "Межмодовое взаимодействие в антисегнетоэлектриках и родственных материалах" была посвящена проявлениям эффектов межмодового взаимодействия в неупругом рассеянии нейтронов. Автор представил возможный вариант объяснения формирования сложных модулированных структур в PZT с малым содержанием титана как результат межмодового фононного взаимодействия. Было прослежено изменение картины критического рассеяния в PZT в области морфотропной фазовой границы, которое, по-видимому, может быть описано как результат смешивания двух сегнетоактивных мод колебаний, приводящего к тому, что обе катионные подрешетки становятся активными. В докладе Бурковского Р.Г. "Критическое рассеяние и несоизмеримые фазы в антисегнетоэлектриках $PbZrO_3$ и $PbHfO_3$ под давлением" были представлены новые результаты экспериментов по неупругому и диффузному рассеянию синхротронного излучения в антисегнетоэлектриках $PbZrO_3$ и $PbHfO_3$. Были освещены противоречия, возникающие при попытках описания критических процессов, и представлены результаты прямой экспериментальной проверки соответствующих гипотез за счёт варьирования сразу двух термодинамических параметров – температуры и давления – с использованием нагреваемых алмазных наковален. Анализ структуры и обобщённой восприимчивости осуществлён на основе данных брэгговского, диффузного и неупругого рассеяния синхротронного излучения. Было показано, что при повышенных давлениях в антисегнетоэктрике $PbZrO_3$ реализуется последовательность ранее не наблюдавшихся фазовых переходов, включающая индуцированный мягкой модой переход в несоизмеримо модулированную структуру, и переход, связанный с фиксацией фазы модуляции. Обнаружена новая, немодулированная высокотемпературная фаза, обладающая симметрией ниже кубической, которая является мостом между родительской кубической фазой и низкосимметричными модулированными структурами. Наличие фазы такого типа при высоких давлениях является общим для антисегнетоэлектриков $PbZrO_3$ и $PbHfO_3$. Тема доклада Воротилова К.А. "Нано- и мезопористые плёнки диэлектриков и сегнетоэлектриков: технология, свойства, применения" касается технологии получения, изучению и формированию свойств, а также применениям пористых сегнетоэлектрических и диэлектрических плёнок, масштабы пор в которых лежат в нано- и мезомасштабе. Подобные плёнки являются новыми физическими объектами с уникальными физическими свойствами и активно исследуются в последние годы в качестве материалов электроники. Интерес к ним в полупроводниковой индустрии связан с проблемой т.н. диэлектриков с низкой диэлектрической проницаемостью, необходимых для уменьшения задержки распространения сигнала при уменьшении размеров элементов интегральных схем. Не останавливаясь подробно, хотелось бы отметить большой интерес на конференции к докладам Мишиной Е.Д. "Сегнетоэлектрик в терегарцовом электрическом поле", Крылова А.С. "Фазовые переходы в кристаллах мультиферроиков со структурой хантита, исследованные методом КР", Писарева Р.В. "Прямые доказательства скрытой структурной нестабильности кубических фтороперовскитов", Шура В.Я. "Формирование дендритных микро- и нано-доменных структур в одноосных сегнетоэлектриках", Волк Т.Р. "Доменная инженерия в оптических волноводных структурах", Стефановича С.Ю. "Семейство сегнетоэлектриков-витлокитов", Холкина А.Л. "Пьезосиловая микроскопия биологических систем", Командина Г.А. "Широкодиапазонная ТГц-ИК спектроскопия активных диэлектриков", Волкова А.А. "Механизм поляризации жидкой воды по данным диэлектрической спектроскопии" и многим другим. В работе конференции приняли участие учёные из основных российских научных центров, в которых активно развиваются направления, составляющие спектр тематик конференции. Такими центрами являются Москва (Московский государственный университет, Институт общей физики РАН, Московский технологический уни-

верситет (МИРЭА), Московский физико-технический институт), Санкт-Петербург (Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН), Ростов-на-Дону (Южный федеральный университет), Красноярск (Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН), Екатеринбург (Уральский федеральный университет), Воронеж (Воронежский государственный технический университет), Казань (Казанский федеральный университет, Казанский физико-технический институт им. Е. К. Завойского РАН). В результате работы семинара были укреплены уже имеющиеся связи между этими организациями и возникли новые связи и направления сотрудничества. Результаты работы конференции подтвердили ведущие позиции российских учёных в физике и технологии сегнетоэлектриков, а также то, что проводимые исследования находятся на мировом научном уровне. Обеспеченность представленных на ВКС-XXI научных направлений научным оборудованием изменилась в последние несколько лет в лучшую сторону. Это связано, прежде всего, со значительным ростом качества экспериментальной научной базы в федеральных университетах за счёт осуществления федеральных программ развития университетов. То же самое можно сказать относительно научных кадров – их качество растёт, и в науку приходят молодые учёные, заинтересованные в получение новых результатов и обладающие навыками работы на современном научном оборудовании. Отметим, что в конференции принимали участие не только авторы представленных докладов, но и более пятидесяти слушателей без докладов из Казанского федерального университета и Казанского физико-технического института, большую часть составили студенты и аспиранты. В этой части конференция послужила основой для развития обсуждаемых направлений исследований в этих учебных и научных учреждениях и стала своего рода учебной площадкой, на которой можно было познакомиться с новыми результатами, полученными в основных научных центрах Российской Федерации. Это, на наш взгляд, послужит основой для привлечения новых научных кадров в затронутые участниками конференции области исследований.

Р. Ф. Мамин

11 Международный симпозиум по фотонному эхо и когерентной спектроскопии (ФЭКС-2017)

Симпозиум ФЭКС-2017 был организован Казанским физико-техническим институтом им. Е. К. Завойского Казанского научного центра Российской академии наук (КФТИ КазНЦ РАН, Казань) и Институтом спектроскопии Российской академии наук (ИСАН, Троицк, Москва) на базе ООО “Центр энергоэффективности” (ООО “ЦЭФ”, Калининград), и проходил в период с 16 по 21 сентября 2017 в г. Светлогорске Калининградской области. Председатель программного комитета: д.ф.-м.н., проф. Самарцев В.В. (КФТИ КазНЦ РАН). Председатель организационного комитета: д.ф.-м.н., проф. Сазонов С.В. (НИЦ Курчатовский институт). Заместители председателей программного и организационного комитетов: д.ф.-м.н., проф. РАН Калачев А.А. (директор КФТИ КазНЦ РАН); д.ф.-м.н., проф. РАН Наумов А.В. (зам. директора ИСАН, зав. каф. МПГУ); к.ф.-м.н. Нестеров С.В. (вед. спец. ООО “ЦЭФ”). Учёный секретарь: к.ф.-м.н. Каримуллин К.Р. (с.н.с. ИСАН, зав. лаб. МПГУ).

В работе симпозиума приняли участие специалисты научно-исследовательских институтов и высших учебных заведений РФ, а также представители зарубежных научно-исследовательских организаций и университетов – всего 100 участников из 42 организаций (из них – 42 молодых учёных, студентов и аспирантов в возрасте до 35 лет). Представлено: 13 пленарных лекций, 18 приглашённых докладов, 42 устных доклада, 34 стендовых доклада; всего – более 200 авторов из 14 стран (РФ, Беларусь, Украина, Великобритания, Италия, Германия, Нидерланды, Польша, Португалия, Румыния, Франция, Индия, США, ЮАР).

По итогам работы симпозиума издан сборник тезисов, проиндексированный в РИНЦ, подготовлен выпуск международного научного журнала EPJ Web of Conferences (vol. 161, 2017), запланировано издание специального выпуска журнала “Известия РАН. Серия физическая” (т. 82, 2018).

Симпозиум открылся 16 сентября видеообращением председателя программного комитета проф. Самарцева В.В. и приветственными сообщениями членов организационного комитета д.ф.-м.н. Сазонова С.В., д.ф.-м.н. Наумова А.В. и д.ф.-м.н. Калачёва А.А.

Пленарная секция 16 сентября началась с приглашённой лекции д.ф.-м.н., профессора, декана факультета фотоники и оптоинформатики Санкт-Петербургского НИУ ИТМО Козлова Сергея Аркадьевича на тему “Измерения нелинейного показателя преломления кристаллов в терагерцовом диапазоне спектра в поле волн из малого числа колебаний”. В лекции сообщалось о результатах измерений нелинейного показателя преломления для кристаллического ZnSe в терагерцовом диапазоне частот. Полученные экспериментальные результаты были подтверждены теоретическими расчётами. Показано, что большой нелинейный отклик имеет огромные перспективы для множества приложений терагерцовой нелинейной оптики.

Большой интерес участников вызвала послеобеденная пленарная приглашённая лекция к.ф.-м.н. Акимова Ильи Андреевича из Университета Дортмунда (Германия), представлявшая собой обзор по спектроскопии фотонного эха при резонансном возбуждении заряженных экситонных комплексов в полупроводниковых наноструктурах. Было показано, что зеемановское расщепление спиновых уровней резидентных электронов в поперечном магнитном поле приводит к появлению квантовых биений сигналов фотонного эха на частоте ларморовской прецессии. При этом в магнитном поле удаётся осуществить когерентный перенос оптического возбуждения в спиновый ансамбль резидентных электронов и наблюдать долгоживущее фотонное эхо.

Послеобеденное заседание продолжилось приглашённым докладом молодого учёного из ИСАН – к.ф.-м.н. Еремчева Ивана Юрьевича “Флуоресцентная микроскопия одиночных коллоидных квантовых точек с субнанометровым пространственным разрешением”, рассказавшего о результатах исследования флуоресцентных свойств одиночных коллоидных квантовых точек с использованием совмещенной схемы флуоресцентного конфокального микроскопа и широкопольного микроскопа со сверхвысоким пространственным разрешением. В дальнем поле удалось достичь предельно высокой точности пространственной локализации положения излучающего центра одиночной КТ (лучше 0.5 нм). Полученная точность позволила по-новому взглянуть на вопрос о локализации центра экситонной излучательной рекомбинации внутри квантовой точки. Доклад к.ф.-м.н. Гладуша Максима Геннадьевича (ИСАН) был посвящён разработке теоретической модели, описывающей флуоресценцию ансамблей квантовых излучателей в замороженной диэлектрической среде с учётом эффектов локального поля. К.ф.-м.н. Бугай Александр Николаевич (ОИЯИ) выступил с сообщением “Взаимодействие терагерцового излучения с биополимерами”. А. Н. Бугаем была рассмотрена нелинейная динамика зарядовых и колебательных возбуждений в клеточных микротрубочках. С помощью численного моделирования исследованы режимы возбуждения молекулярных диссипативных солитонов внешним электромагнитным полем терагерцовой частоты. Заседание завершил доклад молодого учёного из СПбПУ Баранцева Константина Анатольевича на тему “Нелинейные свойства оптически плотных сред при их возбуждении многочастотным лазерным излучением”. Рассмотрено коллективное рассеяние света в оптически плотных средах в условиях когерентного пленения населенностей. Проанализированы световые сдвиги резонанса пленения, возникающие в оптически плотной среде, и способы их подавления.

Вечернее заседание 16 сентября началась с пленарной приглашённой лекции к.ф.-м.н. Шегеды Анатолия Михайловича (КФТИ КазНЦ РАН) на тему “Биения света во время фотонного эха: наблюдение и применение”. Авторами работы предложен и реализован новый метод оптической эхо-спектроскопии для измерения зеемановских и псевдо-штарковских расщеплений частот оптических переходов. Показано, что величина измеряемых расщеплений на несколько порядков меньше неоднородной ширины линии и спектральной ширины лазерного импульса. Временная форма сигнала фотонного эха модулируется в условиях воздействия на резонансную среду импульсом магнитного или электрического поля. Частота модуляции с хорошей точностью совпадает с величиной зеемановского или псевдо-штарковского расщепления в поле, равном амплитуде поля импульса.

Приглашённый доклад д.ф.-м.н., профессора РАН, директора КФТИ КазНЦ РАН Калачёва Алексея Алексеевича “Твёрдотельная рамановская квантовая память в микрорезонаторах: соотношение сигнал/шум” был посвящён теоретическому исследованию возможности реализации оптической квантовой памяти на основе нерезонансного рамановского поглощения и испускания однофотонных импульсов в примесных кристаллах, активированных редкоземельными ионами, с учетом отношения сигнал/шум на выходе запоминающего устройства. На примере кристалла $^{143}Nd^{3+}:Y^{7}LiF_4$ показано, что отношение сигнал/шум может существенно превышать единицу для однофотонных входных импульсов, при условии, что запись и воспроизведение квантовых состояний осуществляется в примесном кристалле, образующем кольцевой резонатор с модами шепчущей галереи. Далее состоялся доклад к.ф.-м.н. Шкаликова Андрея Викторовича (КФТИ КазНЦ РАН) на тему “Приготовление однофотонных состояний в процессе спонтанного параметрического рассеяния света в кристалле PPLN в резонаторе для квантовой памяти на основе $YLiF_4$”. В докладе был рассмотрен источник однофотонных состояний фотонов и результаты исследований его спектральных и корреляционных характеристик. Источник основан на спонтанном параметрическом рассеянии света в кристалле ниобата лития с периодической доменной структурой, который помещен в резонатор. Завершающий доклад секции “Фемтосекундная времяразрешённая селективная спектроскопия внутримолекулярной и межмолекулярной динамики в жидкостях на основе сверхбыстрого оптического эффекта Керра” был представлен молодым сотрудником КФТИ КазНЦ РАН Жарковым Дмитрием Константиновичем. В работе были представлены результаты экспериментов и моделирования по селективной спектроскопии низкочастотных либрационных откликов в различных жидкостях при комнатной температуре.

Работа секции “Квантовая оптика и квантовые технологии” 17 сентября началась с пленарной приглашённой лекции проф. Мирошниченко Георгия Петровича из СПб НИУ ИТМО на тему “Декогеренция однофотонного пакета в неидеальном оптическом волокне”, в которой было рассмотрено уравнение Лиувилля, описывающее развитие матрицы плотности однофотонного пакета, распространяющегося в оптическом волокне и его решение в представлении Шредингера. К.ф.-м.н. Глейм Артур Викторович представил приглашённый доклад по результатам совместной работы коллективов из Казанского

квантового центра (КНИТУ-КАИ им. А. Н. Туполева) и СПб НИУ ИТМО по практической реализации многоузловой квантовой сети на основе технологии квантовой коммуникации на боковых частотах в г. Казани. Далее состоялись доклады Кынева Сергея Михайловича (СПб НИУ ИТМО "Передача квантовых состояний на боковых частотах модулированного излучения через атмосферный канал связи" и Семина Виталия Владимировича (Самарский НИУ им. акад. С. П. Королёва) "Точная динамика двухуровневого атома без приближения вращающейся волны".

В секции "Эффекты нелинейного взаимодействия излучения с веществом" с приглашённым докладом на тему "Квазисинхронные взаимодействия в двумерных нелинейных фотонных кристаллах" выступил молодой сотрудник Института физики им. Л. В. Киренского СО РАН Вьюнышев Андрей Михайлович, рассказавший о теоретических и экспериментальных результатах по квазисинхронной генерации второй гармоники в двумерных нелинейных фотонных кристаллах в режимах нелинейной дифракции Рамана-Ната и Брэгга. Было показано, что выбор типа и параметров структуры позволяет существенно повысить эффективность нелинейно-оптического преобразования одновременно для нескольких порядков нелинейной дифракции, а также модифицировать спектральные и угловые характеристики генерируемого излучения. Секция продолжилась сообщением Калиновича Алексея Андреевича (МГУ им. М. В. Ломоносова) "Формирование солитонов в волноводе при генерации второй гармоники". Далее состоялся доклад д.ф.-м.н. Божокина Сергея Валентиновича (СПбПУ) на тему "Вейвлет-анализ нестационарного сигнала флуоресценции ансамбля неподвижных точечных рассеивателей". В своей работе С. В. Божокин на основе квантового микроскопического подхода рассчитал динамику флуоресценции атомного облака, охлаждённого до сверхнизких температур в специальной ловушке и возбуждённого импульсным излучением. Был выполнен анализ спектрального состава излучения флуоресценции и его изменения со временем после окончания возбуждения для различных направлений и поляризаций.

Послеобеденное заседание началось с пленарной приглашённой лекции проф. Федорова Михаила Владимировича (ИОФ РАН) "Поляризации фотонов в неколлинеарном спонтанном параметрическом рассеянии", в которой обсуждалась возможность прямого измерения поляризаций фотонов на основе эффекта Хонга-У-Манделя. В рамках исследования процесса неколлинеарного спонтанного рассеяния была получена общая формула, определяющая зависимость поляризаций фотонов от азимутальных углов их волновых векторов. Приглашённый доклад д.ф.-м.н. Манцызова Бориса Ивановича (МГУ им. М. В. Ломоносова) был посвящён полуаналитическому решению задачи распространения оптических импульсов и пучков в PT-симметричных фотонных кристаллах в условиях динамической дифракции в геометрии Лауэ. Далее свои сообщения представили Гарифуллин Адель Ильдусович (КФУ) "Электромагнитная масса электрона в одномерном фотонном кристалле"; д.ф.-м.н. Чижов Алексей Владимирович (ОИЯИ) "Динамика спонтанного излучения двухуровневого атома в параболическом резонаторе" и д.ф.-м.н. Ржанов Алексей Георгиевич (МГУ им. М. В. Ломоносова) "Особенности моделирования полупроводниковых лазеров с широким контактом". В докладе А. Г. Ржанова рассматривались аспекты математического расчёта динамики и статики излучения мощных полупроводниковых лазерных диодов; основные физические механизмы, влияющие на мощность, спектральный состав, дальнее и ближнее поле излучения лазеров. Разработана динамическая распределённая модель полупроводникового лазера с широким контактом и рассмотрены возможности её реализации.

Вечернее заседание секции "Эффекты нелинейного взаимодействия излучения с веществом" открыл проф. Кулик Сергей Павлович (МГУ им. М. В. Ломоносова) прочитавший приглашённую пленарную лекцию на тему "Трёхфотонная спектроскопия". Был рассмотрен эффект трёхфотонной интерференции, возникающий при спонтанной генерации бифотонов в нескольких сегнетоэлектриках, разделенных линейными прослойками. Обнаружено, что возникающее в дальней зоне частотно-угловое распределение интенсивности бифотонного поля существенно зависит от набегов фаз в трёх модах поля, участвующих в процессе спонтанного параметрического рассеяния света. Отдельно был рассмотрен особенно интересный случай, когда частота одной из мод лежит в области собственных колебаний среды-прослойки. С приглашённым докладом на тему "Когерентные квантовые состояния в тонкопленочных нанокластерных структурах: оптические и электрофизические свойства" выступил проф. Аракелян Сергей Мартиросович (ВлГУ им. А. Г. и Н. Г. Столетовых). Лазерными методами были получены наноструктурированные тонкие плёнки на твёрдых подложках, для которых возможность управления их функциональными свойствами реализуется из-за разной топологии и элементного состава осаждаемых материалов. Зарегистрировано увеличение электропроводимости (на порядки величин) в зависимости от поверхностных и граничных условий в различных топологически организованных кластерных системах. Существует возможность высокотемпературной сверхпроводимости в таких нанокластерных структурах, которые, во-первых, являются стабильными, и, во-вторых, в них могут реализовываться размерные (нефононные) механизмы спаривания электронов. Заседание 17 сентября завершилось выступлениями к.ф.-м.н. Прохорова Алексея Валерьевича (ВлГУ им. А. Г. и Н. Г. Столетовых) "Формирование неклассических состояний в связанных нелинейными плазмон-экситонными взаимодействиями субволновых системах" и к.ф.-м.н. Прудковского Павла Андреевича (МГУ им. М. В. Ломоносова) "Коническая неустойчивость в фоторефрактивных кристаллах SPS".

Вечером состоялась стендовая секция, где было представлено 17 докладов, среди которых особый интерес участников вызвали работы Аржанова Артёма Игоре-

вича (ИСАН; МПГУ) “Низкотемпературная оптическая дефазировка в ансамбле полупроводниковых коллоидных квантовых точек CdSe/CdS/ZnS: исследование методом некогерентного фотонного эха”, Баходурова Амирхона Усмоновича (ПГТУ) “Регистрация в режиме on-line фемтосекундных временных интервалов на основе поляризационных свойств сигналов стимулированного фотонного эха на экситонных состояниях”, Горшелева Алексея Алексеевича (ИСАН) “Влияние дефектов в диэлектрических молекулярных кристаллах на параметры бесфононных спектральных линий примесных хромофорных молекул”, Конобеевой Натальи Николаевны (ВолГУ) “Трёхмерные предельно короткие оптические импульсы в германене с затуханием и усилением”, Леонтьева Андрея Владимировича (КФТИ КазНЦ РАН) “Пикосекундная динамика фотовозбужденных состояний в кристаллах Ce^{3+}:$LiY_xLu_{(1-x)}F_4$” и Малышева Виктора Александровича (University of Groningen, The Nederlands) “Многоканальный оптический переключатель на основе тонкого слоя резонансных двухуровневых излучателей”.

Утром 18 сентября заседание секции “Эффекты нелинейного взаимодействия излучения с веществом” началось с приглашённой пленарной лекции проф. Маймистова Андрея Ивановича (НИЯУ МИФИ) “Прямые и обратные волны в дискретной фотонике”. В лекции обсуждались электромагнитные волны, распространяющиеся в массивах волноводов, которые образованы чередующимися волноводами с положительным и отрицательным показателем преломления, т.е. в условиях когда реализуется взаимодействие прямых и обратных волн. Приглашённый доклад на тему “Модели динамики атомов, взаимодействующих с пространственно разделенными квантованными вакуумными полями” представил проф. Башаров Асхат Масхудович (НИЦ “Курчатовский институт”), рассказавший о возможности обобщения моделей связанных резонаторов, световодов, локализованных мод в фотонных кристаллах и т.п. на случай учета широкополосных вакуумных полей и их связи на границах областей локализации. В работе было найдено необходимое обобщение алгебры дифференциалов Ито (алгебры Хадсона-Партасарати) для учёта операторов обмена квантов разный вакуумных полей (наряду со считыающими операторами), сформулированы квантовые стохастические дифференциальные уравнения невинеровского типа, получены и решены кинетические уравнения для нескольких модельных задач. Доклад проф. Елютина Сергея Олеговича (НИЯУ МИФИ) был посвящён рассмотрению когерентных эффектов, возникающих при прохождении и отражении импульсов произвольной длительности, в том числе предельно коротких импульсов в форме пульсона, через тонкую плёнку метаматериала, расположенного на границе между двумя диэлектрическими средам. К.ф.-м.н. Устинов Николай Витальевич (МИИТ) представил доклад на тему “Нелинейное распространение предельно коротких солитонов в анизотропной микродисперсной среде”.

Далее с приглашённым докладом на тему “Анализ возможности создания фазовых пространственных модуляторов света на основе жидкокристаллических сегнетоэлектриков” выступила проф. Котова Светлана Павловна из Самарского филиала ФИАН. В работе методом численного моделирования с использованием экспериментальных модуляционных характеристик была исследована возможность построения фазовых зональных пространственных модуляторов света на основе квадратичного электрооптического эффекта в жидкокристаллических сегнетоэлектриках, позволяющих обеспечить частоты модуляции около 1 кГц. Возможности таких модуляторов для формирования световых полей с орбитальным угловым моментом были рассмотрены в докладе Майоровой Александры Михайловны (Самарский филиал ФИАН). С завершающим докладом на утреннем заседании выступила молодая сотрудница Санкт-Петербургского политехнического университета Непомнящая Элина Константиновна, рассказавшая о разработке устройства лазерной корреляционной спектроскопии и его модификациях для исследования различных биологических жидкостей.

Послеобеденное заседание открыл проф. Сазонов Сергей Владимирович (НИЦ “Курчатовский институт”), выступивший с приглашённой пленарной лекцией “Волноводный режим генерации терагерцового излучения”. В работе был исследован оптический метод генерации широкополосного терагерцового излучения в градиентном волноводе. Выявлены условия захвата оптического и терагерцового импульсов и коллинеарных распространений их связанных состояний. Показано, что данный захват возможен как в случае нормальной, так и аномальной групповой дисперсии оптического сигнала. Далее состоялись выступления членов научной группы под руководством Белоненко Михаила Борисовича (Волгоградский институт бизнеса). М. Б. Белоненко выступил с приглашённым докладом “Предельнокороткие оптические импульсы в ферми-жидкости и маргинальной ферми-жидкости”. Была рассмотрена задача о распространении двумерных и трёхмерных уединенных электромагнитных волн в Ферми жидкости, в том числе и маргинальной с использованием подхода ADS/CFT соответствия. Исследована эволюция световой пули в Ферми жидкости с учетом приложенного магнитного поля и определено влияние амплитуды и периода магнитного поля на форму и характер распространения световой пули. Обнаружено, что световые пули оказываются устойчивыми при распространении в Ферми жидкости с учетом магнитного поля. Далее выступили молодые сотрудники Волгоградского государственного университета Двужилов Илья Сергеевич с докладом на тему “Трёхмерные предельно короткие оптические импульсы в неоднородной среде углеродных нанотрубок в оптическом резонаторе” и Невзорова Юлия Владимировна с докладом “Световые пули в брэгговской среде с углеродными нанотрубками во внешнем магнитном поле”. Секция завершилась сообщением Трубилко Андрея Игоревича (Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России) на тему “Эффекты проявления начальных корреляций при когерентном рассеянии атома на стоячей электромагнитной волне”.

На вечернем заседании секции “Квантовая оптика и квантовые технологии” с приглашённой пленарной лекцией “Интегрируемые модели квантовой оптики” выступил проф. Юдсон Владимир Исаакович (Высшая школа экономики; ИСАН). Был представлен обзор точно решаемых многочастичных моделей квантовой оптики. Для системы резонансных атомов, взаимодействующих с распространяющимся квантовым электромагнитным полем в одномерном киральном волноводе, описан подход, позволяющий построить точные многофотонные волновые функции системы. Были также затронуты существующие проблемы в описании систем с нарушенной интегрируемостью. Приглашённый доклад проф. Наумова Андрея Витальевича (ИСАН, МПГУ) на тему “Оптическая эхо-спектроскопия как метод исследования низкотемпературной динамики неупорядоченных твёрдых сред и композитов с квантовыми точками” был посвящён обзору исследований стекол и полимеров с примесными органическими молекулами с использованием техники фотонного эха. Были показаны возможности данной методики для получения информации об ультрабыстрых релаксационных процессах в таких средах в широком диапазоне низких температур. Приведены результаты сравнительного анализа экспериментальных данных о спектрах одиночных примесных молекул и кривых спада фотонного эха в полимерной матрице, проясняющих соответствие и взаимодополняемость этих двух методов при исследованиях процессов оптической дефазировки и спектральной диффузии. Далее состоялись доклады сотрудников Поволжского государственного технологического университета к.ф.-м.н. Баева Алексея Александровича “Компьютерный анализ изображений одиночных точечных излучателей для трёхмерного трекинга” и д.ф.-м.н. Роженцова Алексея Аркадьевича “Решение задачи обнаружения изображений одиночных наноразмерных излучателей во флуоресцентной микроскопии”, посвящённые математической обработке массивов данных, получаемых в многопараметрической оптической наноскопии ансамблей большого числа одиночных квантовых излучателей.

По окончании вечернего заседания состоялась вторая стендовая секция, где было представлено 17 докладов, среди которых можно выделить работы Прокоповой Дарьи Владимировны (Самарский филиал ФИАН) “Формирование световых полей с вращением распределения интенсивности при наличии амплитудных и фазовых искажений”, Самарцева Виталия Владимировича (КФТИ КазНЦ РАН) “Коррелированные сигналы кластерной суперфлуоресценции в наноструктурированных образцах CdSe/CdS в условиях двух- и трёхквантового фемтосекундного возбуждения”, Старухина Александра Степановича (Институт физики НАНБ) “Photophysical study of mesophenothiazinylporphyrins metallocomplexes”, Турайханова Динислама Амаровича (КФТИ КазНЦ РАН) “Генерация однофотонных состояний с орбитальным угловым моментом в режиме спонтанного параметрического рассеяния в резонаторе”, Чуприны Ильи Николаевича (КФТИ КазНЦ РАН) “Спонтанное четырёхволновое смешение в кольцевых микрорезонаторах с импульсной накачкой” и Шестерикова Александра Вячеславовича (ВлГУ им. А. Г. и Н. Г. Столетовых), “Формирование плазмон-поляритонных импульсов в процессе кооперативного распада экситонов квантовых точек вблизи металлической поверхности”.

19 сентября для участников конференции были организованы автобусные экскурсии в г. Калининград и на Куршскую косу.

Заседание секции “Спектроскопия ультрабыстрых процессов” 20 сентября началось с приглашённой пленарной лекции проф. Кандидова Валерия Петровича (МГУ имени М. В. Ломоносова) на тему “Световые пули в прозрачных диэлектриках”. В своей лекции В. П. Кандидов рассказал о современном состоянии исследований феномена световых пуль в явлении филаментации фемтосекундного лазерного излучения в прозрачных диэлектриках. Приглашённый доклад к.ф.-м.н. Мельникова Алексея Алексеевича (ИСАН), на тему “Когерентные фононы в Bi_2Se_3, индуцированные мощным однопериодным терагерцовым импульсом” был представлен его соавтором С. В. Чекалиным. В докладе сообщалось о регистрации методом электрооптического детектирования когерентных фононов, генерирующихся в кристаллической пленке Bi_2Se_3 под воздействием мощного однопериодного ТГц импульса. Доклад к.ф.-м.н. Компанца Виктора Олеговича (ИСАН) “Direct measuring of single-cycle Mid-IR light bullets path length at various filamentation regimes in LiF by the laser coloration method” был посвящён экспериментальному и теоретическому исследованию структуры центра окраски, формирующегося в кристалле LiF при филаментации фемтосекундного лазерного импульса среднего ИК-излучения, с мощностью, немного превышающей критическую мощность для самофокусировки. Далее с докладом “Фемтосекундная филаментация оптического вихря в условиях аномальной дисперсии групповой скорости” высупил Шленов Святослав Александрович (МГУ имени М. В. Ломоносова).

Заседание продолжил приглашённый доклад к.ф.-м.н. Никифорова Виктора Геннадьевича (КФТИ КазНЦ РАН) на тему “Спектроскопия низкочастотных межмолекулярных движений в жидкости на основе двухимпульсного фемтосекундного возбуждения сверхбыстрого оптического эффекта Керра. В работе В. Г. Никифорова была экспериментально реализована спектроскопия низкочастотного отклика межмолекулярных колебаний в бензонитриле на основе двухимпульсного лазерного контроля когерентных движений молекул и регистрации сверхбыстрого оптического эффекта Керра. Детальный сравнительный анализ оптических молекулярных откликов третьего порядка убедительно показал, что применение двухимпульсного возбуждения сверхбыстрого оптического эффекта Керра является мощным спектроскопическим методом для получения обоснованной информации о спектре межмолекулярных движений. Далее с сообщением на тему “Электроуправляемые фазы частично поляризованного света и ориентационный эффект Керра в жидкокристаллических сегнетоэлектриках” выступил Киселев Алексей Донислaвович (СПбНИУ ИТМО),

представивший результаты теоретических и экспериментальных исследований электрооптических свойств короткошаговых сегнетоэлектрических жидких кристаллов с деформированной спиральной структурой, освещённых частично поляризованным светом. Были рассмотрены механизм и характеристики ориентационного эффекта Керра в таких средах. Заседание секции завершил доклад к.ф.-м.н. Сметаниной Евгении Олеговны из Университета Бордо (Франция) на тему "Формирование световых пуль и генерация нечетных гармоник при филаментации фемтосекундного лазерного излучения среднего ИК диапазона"

Послеобеденное заседание началось с приглашённой пленарной лекции проф. Попова Ивана Ивановича (Поволжский государственный технологический университет) на тему "Магнитооптические свойства фотонного эха: состояние исследований и перспективы применений". В своей лекции И. И. Попов рассказал об исследованиях поляризационных свойств сигналов стимулированного фотонного эха, возбуждаемого при комнатной температуре в тонких пленок полупроводников. Приглашённый доклад молодого сотрудника Казанского квантового центра (КНИТУ-КАИ им. А. Н. Туполева) Урманчеева Равиля Василевича "DC Stark addressing for quantum memory in Tm:YAG" был посвящён наблюдению линейного Штарк-эффекта на оптическом переходе $^3H_6$-$^3H_4$ ионов тулия в кристалле $Y_3Al_5O_{12}$. Была продемонстрирована возможность восстановления сигнальных световых импульсов в режиме фотонного эха в условиях приложения импульсов электрического поля к образцу. Далее состоялись доклады Бабанина Евгения Александровича (МГУ им. М. В. Ломоносова) на тему "Время-частотные нелинейные отображения позиционных характеристик одномодовых и многомодовых волновых пучков на выходе протяженной атмосферной трассы" и Бланка Аркадия Викторовича (РКК "Энергия" им. С. П. Королёва) "Квазистатические термические и нелинейные процессы фотопреобразования оптического излучения высокой плотности многослойными структурами". Заседание завершил доклад д.ф.-м.н., проректора по научной работе МарГУ Леухина Анатолия Николаевича на тему "Низкоэнергетические спиновые системы на основе модели Бернаскони". В своем докладе А. Н. Леухин рассказал о проблеме построения бинарных последовательностей с низким уровнем боковых лепестков импульсной автокорреляционной функции и о её решении.

На вечернем заседании пленарную приглашённую лекцию на тему "Исследование быстропротекающих процессов в веществе с помощью сверхбыстрой электронной дифракции и микроскопии" прочитал проф. Чекалин Сергей Васильевич (ИСАН). В своей лекции С. В. Чекалин затронул одну из актуальных задач современного естествознания – непосредственное наблюдение атомных движений в ходе различных процессов. Для этого в эксперименте необходимо обеспечить высокое пространственно-временное разрешение. Решение этой задачи достигается путем использования сверхкоротких импульсов электронных пучков для создания стробоскопической дифракционной картины в методе дифракции электронов с временным разрешением. Приглашённый доклад д.ф.-м.н. Старухина Александра Степановича (Институт физики им. Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси) "Spectral manifestation of distorted forms metalloporphyrins at low temperatures" был посвящён селективной лазерной спектроскопии ряда металлопорфиринов. Было продемонстрировано проявление в спектрах поглощения и люминесценции различных спектральных форм в твёрдых растворах (матрицы Шпольского, твёрдый тетрагидрофуран, твёрдые матрицы инертных газов) при криогенных температурах. В докладе проф. Маликова Рамиля Фаруковича (БГПУ им. М. Акмуллы) "Нелинейный оптический отклик двухмерного суперкристалла квантовых точек" сообщалось о теоретическом исследовании различных нелинейных эффектов, включая бистабильность, автоколебания и динамический хаос, в двумерном суперкристалле, состоящем из полупроводниковых квантовых точек. Заседание завершилось сообщением проф. Рыжова Игоря Викторовича (РГПУ им. А. И. Герцена) на тему "Сверхизлучение без инверсии в резонаторе: эффекты потерь резонатора и релаксации в системе излучателей".

Утреннее заседание 21 сентября началось с приглашённой пленарной лекции проф. Камчатнова Анатолия Михайловича (ИСАН) "Дисперсионные ударные волны в нелинейной и атомной оптике", в которой на основе теории модуляций Уизема был развит подход к теоретическому описанию дисперсионных ударных волн в нелинейных волновых системах. Теория была применена к наблюдаемым на эксперименте дисперсионным ударным волнам в световодах с учётом запаздывания отклика и к поляризационным модам в удерживаемых в ловушках бозе-эйнштейновских конденсатах. Получена классификация волновых структур, образующихся при распаде разрывов в начальных условиях. Далее состоялись доклады молодых учёных из КФТИ КазНЦ РАН. К.ф.-м.н. Латыпов Ильнур Зиннурович выступил с приглашённым докладом "Управление спектральными характеристиками однофотонных состояний света генерируемых в процессе спонтанного четырёхволнового смешения в микроструктурированных световодах". В работе И. З. Латыпова были проанализированы возможности генерации широкополосных однофотонных волновых пакетов в режиме спонтанного четырёхволнового смешения в волоконных структурах с активно формируемым профилем дисперсии; исследованы спектральные и корреляционные характеристики генерируемых неклассических состояний света в коммерческих фотонно-кристаллических волокнах и редложен перспективный дизайн структуры для формирования широкополосных однофотонных состояний. С сообщением на тему "Перспективы наблюдения спонтанного параметрического рассеяния света при низкой температуре" выступил Акатьев Дмитрий Олегович, а к.ф.-м.н. Шмелёв Артемий Геннадьевич представил доклад "Многоцветная сверхбыстрая спектроскопия оптических процессов в квантовых точках CdSe/CdS".

Далее с приглашённым докладом на тему "Experimental test of duality in entanglement via the Bell measurements"

выступила к.ф.-м.н. Морева Екатерина Васильевна (Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica, Italy), рассказавшая об экспериментальном исследовании дуализма в перепутанном состоянии двух идентичных частиц. Эксперимент авторов показал, как один и тот же источник перепутанных фотонов может использоваться как источник поляризационного перепутанного состояния или перепутанного состояния по импульсу, разделённого между удалёнными пользователями Алисой и Бобом, в зависимости от того как проводятся проекционные измерения. В докладе к.ф.-м.н. Попова Евгения Николаевича "Оптическая накачка магнитного момента атомов щелочного металла при нулевой спиновой поляризации" была продемонстрирована возможность искусственной подготовки атомов щелочного металла в состояние, при котором атом обладает отличным от нуля магнитным моментом, но вектор спиновой поляризации равен нулю, то есть среднее значение спиновых операторов Паули по всем трём координатам нулевое. Для подготовки подобных состояний предложено использовать два узких лазерных пучка круговой поляризации, настроенных в резонанс с двумя переходами в D_1 линии щелочного металла. В работе были найдены отношения напряжённостей лазерных пучков, при которых реализуются описанные состояния атомов и на основе расчётов построены кривые этих отношений.

Завершающим в утренней секции стал приглашённый доклад Фофанова Якова Андреевича (Институт аналитического приборостроения РАН) "О критериях сильных и слабых поляризационных откликов упорядоченных объектов и систем". В докладе автор показал, что слабые отклики обладают важными свойствами линейности (пропорциональности) и аддитивности. В качестве примера были рассмотрены отклики магнитоупорядоченных материалов, оптических кристаллов и ансамблей магнитных наночастиц. Исследования поляризационных откликов магнитных жидкостей показали их высокую чувствительность к введению коагулирующих примесей и процессам агломерации магнитных наночастиц.

Послеобеденное заседание открыл доклад Шестакова Павла Юрьевича (МГУ им. М. В. Ломоносова) "Туннелирование электромагнитного излучения в чирпированной диэлектрической структуре". В данной работе был рассмотрен оптический аналог туннелирования релятивистских электронов через высокий потенциальный барьер (туннелирование Клейна) и рассчитаны времена туннелирования световых импульсов через квазипериодическую структуру, а также показано насыщение времени туннелирования в области фотонного барьера. В докладе д.ф.-м.н. Павлова Виктора Владимировича (ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН) на тему "Гигантская третья оптическая гармоника в магнитном поле в области 1s экситона в GaAs" было показано, что изменение внешнего магнитного поля в диапазоне 0–10 Т приводит к гигантскому усилению интенсивности генерации третьей оптической гармоники в объемном GaAs. Это явление объясняется повышением силы осциллятора 1s экситона, а также тонкой подстройкой экситон-поляритонных состояний во внешнем магнитном поле.

Приглашённый доклад к.ф.-м.н. Синайского Ильи Евгеньевича (Университет КваЗулу-Наталь, ЮАР) был посвящён эффектам открытого квантового броуновского движения и открытым квантовым блужданиям. Далее выступили проф. Абрамов Валерий Сергеевич (ДонФТИ им. А. А. Галкина) с докладом "Поле Хиггса и космологические параметры во фрактальной квантовой системе" и проф. Бирюков Александр Александрович (Самарский НИУ им.

Общая фотография участников 11 Международного симпозиума по фотонному эхо и когерентной спектроскопии (ФЭКС-2017).

акад. С. П. Королёва) с докладом на тему “Численные вычисления вероятностей квантовых переходов в атомах и молекулах методом функционального интегрирования”

С интересным докладом на тему “Исследование нелинейных свойств высокодобротных оптических микрорезонаторов в области нормальной дисперсии групповых скоростей” выступил молодой сотрудник МГУ им. М. В. Ломоносова и Российского квантового центра Шитиков Артем Евгеньевич. В работе А. Е. Шитикова была экспериментально реализована генерация керровских частотных гребёнок в области нормальной дисперсии групповых скоростей в кристаллических микрорезонаторах с модами шепчущей галереи. Проведены эксперименты при накачке на длинах волн 780 нм и 1064 нм, и продемонстрирована генерация частотных гребёнок и платиконов. Завершающим докладом на симпозиуме стало сообщение проф. Хасанова Олега Хайрулловича (НПЦ по материаловедению Национальной академии наук Беларуси) на тему “Сценарии пространственно-временной локализации мощных фемтосекундных вихревых импульсов в керровских средах” об исследовании режимов генерации световых пуль в условиях филаментации сингулярных фемтосекундных импульсов тераватной мощности в керровских средах в зависимости от параметров падающих импульсов и образцов методами двухмасштабного вариационного анализа и численного моделирования.

На заключительном заседании состоялось подведение итогов конкурса научных работ молодых учёных и награждение победителей, а также было принято решение 11 международного симпозиума по фотонному эхо и когерентной спектроскопии.

В. В. Самарцев, председатель
Программного комитета ФЭКС-2017
А. А. Калачёв, заместитель председателя
Программного комитета ФЭКС-2017;
С. В. Сазонов, председатель
Организационного комитета ФЭКС-2017;
А. В. Наумов, заместитель председателя
Организационного комитета ФЭКС-2017
К. Р. Каримуллин, учёный секретарь
ФЭКС-2017

Международная конференция “Modern Development of Magnetic Resonance”

С 25 по 29 сентября в Казани прошла ежегодная международная конференция “Современное развитие магнитного резонанса”, приуроченная к вручению международной премии им. Е. К. Завойского. Мероприятие проводилось при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Правительства Республики Татарстан и фирмы Брукер Биоспин. Основным организатором конференции выступил Казанский физико-технический институт им. Е. К. Завойского, соорганизатором – Казанский федеральный университет. Сопредседатели конференции – академик К. М. Салихов и профессор РАН А. А. Калачёв.

В работе конференци приняло участие 120 учёных и аспирантов, из них 22 иностранных учёных из США, Бельгии, Германии, Швеции, Голландии, Израиля, Франции, Китая, Японии.

Российские участники были представлены учёными из Казани, Москвы, Черноголовки, Сколково, Нижнего Новгорода, Санкт-Петербурга, Симферополя, Новосибирска, Калининграда, Красноярска.

На конференции было сделано 8 пленарных докладов, 52 приглашённых и устных докладов по направлениям:

– низкомерные системы и нано-системы;
– теория магнитного резонанса;
– информационные процессы на основе спинов;
– молекулярный магнетизм и жидкие кристаллы;
– современные методы магнитного резонанса;
– сильно коррелированные электронные системы;
– химические и биологические системы;
– методы, основанные на электронном спине, для определения электронных и пространственных структур в физике, химии и биологии;
– ЯМР томография,
– инструменты магнитного резонанса;
– другие применения магнитного резонанса, перспективы магнитного резонанса в науке и спиновых технологиях.

60 докладов по указанным направлениям были представлены на стендовой сессии.

Открытие конференции было совмещено с церемонией вручения международной премии имени Е. К. Завойского в 2017 г. Состоялась также специальная сессия, посвящённая 110-летию Е. К. Завойского.

Все представленные российскими учёными доклады говорят о высоком уровне исследований, проводимых в РФ методом магнитного резонанса. Во многих направлениях российские учёные занимают лидирующее положение в мире.

Следует отметить, что из 8 пленарных докладов 3 доклада сделали российские учёные.

Отличительной особенностью этой ежегодной международной конференции является то, она стала местом диалога физиков, химиков, биофизиков, биологов, представителей

Александр Иванович Смирнов, д.ф.-м.н., проф. (Институт физических проблем им. П. Л. Капицы РАН, Москва).

Валерий Владимирович Рязанов, д.ф.-м.н. (Институт физики твёрдого тела РАН, Черноголовка).

разных направлений науки. Их объединяет общий метод исследования – спектроскопия магнитного резонанса.

Физика больше всего была представлена российскими учёными.

А. И. Смирнов в пленарном докладе “Магнитный резонанс спинонов в квазиодномерных $S = 1/2$ антиферромагнетиках со слабым обменным взаимодействием” представил результаты исследований квази-одномерных систем, проводимых в Институте физических проблем им. П. Л. Капицы. Эта одна из немногих групп в мире, которая успешно исследует эффекты, обусловленные взаимодействием Дзялошинского-Мории. Спиновые системы в кристаллах с различной геометрией обменных связей являются модельными объектами, имеющими важное познавательное и фундаментальное значение для физики макроскопических квантовых явлений. В таких системах наблюдаются эффекты, неожиданные с классической точки зрения, и обнаруживаются новые, существенно квантовые, макроскопические эффекты. Например, в диэлектрических кристаллах с квазиодномерной структурой антиферромагнитных обменных связей, реализуются при низкой температуре спин-жидкостные фазы, фазы спиновых нематиков, магнетики с малым параметром порядка и преобладающим влиянием нулевых квантовых флуктуаций. С помощью экспериментов, проводимых методом электронного спинового резонанса при низких и сверхнизких температурах, в ИФП изучают спиновые структуры, в формировании которых важную роль играют нулевые квантовые флуктуации и спектры элементарных возбуждений этих структур. Методами магнитного резонанса изучены различные виды магнитного упорядочения в антиферромагнитных диэлектриках с сильным влиянием пониженной размерности на их физические свойства. Изучены спектры магнитных возбуждений в антиферромагнетиках с сильной редукцией упорядоченной компоненты спина и с полностью разупорядоченным за счёт квантовых флуктуаций основным состоянием. Лекция А. И. Смирнова была очень хорошо встречена всеми участниками, так как Александр Иванович сумел очень наглядно, доходчиво подвести слушателей в существо обсуждаемых им вопросов.

В разделе “Низкоразмерные и нано-системы” необходимо отметить также доклад В. В. Рязанова из Института твёрдого тела РАН о возможностях ферромагнитного резонанса для исследования эффектов близости и особенностей прохождения микроволнового сигнала через гибридные метаматериалы и джозефсоновские структуры на основе многослойных систем сверхпроводник/ферромагнетик/сверхпроводник.

Метод регистрации спиновых токов в неколлинеарных магнетиках был представлен А. А. Фраерманом (Институт физики микроструктур РАН). Развита гидродинамическая модель, описывающая генерацию второй гармоники при отражении оптического излучения от ферромагнетика с неколлинеарным распределением намагниченности. Показано, что в основном это отражение связано с генерацией лазерным излучением спинового тока на удвоенной частоте. Конверсия этого тока в электрический за счёт обратного спинового эффекта Холла и приводит к генерации электромагнитных волн на удвоенной частоте. Высокий уровень экспериментальных и теоретичеких исследований был продемонстрирован в работах А. С. Мельникова, В. Л. Миронова, Е. Зверевой.

Ещё одно важное применение ЭПР в физике – это исследование сильно коррелированных электронных систем. В докладе С. В. Демишева (Институт общей физики РАН) были представлены результаты исследования электронного нематического эффекта в CeB_6. Впервые выполнены исследования анизотропии ЭСР в сильно коррелированном металле CeB_6 и обнаружена корреляция между данными ЭСР и нейтронного рассеяния. Установлен

Хитоши Охта, доктор, проф. (Университет Кобе, Япония).

факт возникновения аномальной спиновой релаксации в квантовых критических точках.

Электронный парамагнитный резонанс находит широкое применение в материаловедении. Одним из самых традиционных направлений является исследование свойств лазерных кристаллов, изучение природы активных центров лазерных материалов. Это направление традиционно очень хорошо развивается в Казани. Этой проблеме была посвящена пленарная лекция В. Ф. Тарасова (Казанский физико-технический институт РАН). В частности, В. Ф. Тарасов представил доказательства самоорганизации (димеризацию) примесных редкоземельных ионов, активных центров, в лазерных кристаллах синтетического форстерита.

Впечатляющие результаты по развитию терагерцовой ЭПР-спектроскопии были представлены в пленарной лекции проф. Хитоши Охта (Кобе университет, Япония). Он и его сотрудники работают в диапазоне частот 30 ГГц–7 ТГц, внешнее магнитное поле (импульсное) изменяется от нуля до 55 Т. Температуру в своих опытах они могут изменять в интервале 1.8–300 К, а также проводить ЭПР-измерения под давлением до 2.7 ГПа. Отметим, что в высокочастотной ЭПР-спектроскопии традиционно хорошие позиции занимает Казанский физтех. На конференции были представлены результаты измерений характеристик примесных центров в гранате, полученные Г. С. Шакуровым (КФТИ РАН) с использованием цирокополосного высокочастотного ЭПР-спектрометра.

Квантовые вычисления и квантовая информатика на основе использования спинов в качестве кубитов – новое направление применения электронного парамагнитного резонанса. В этом году премия им. Е. К. Завойского была присуждена проф. Такеджи Такуи (Осака Сити университет, Япония). Профессор Такуи признан одним из мировых лидеров в области новой спиновой технологии. Пленарная лекция Т. Такуи была посвящена интересной теме многоспиновых молекул, молекул, содержащих много неспаренных электронов. Такие молекулы представляют большой интерес с точки зрения создания мономолекулярных магнитов. Проф. Такуи обрисовал проблемы синтеза таких молекул и представил результаты их исследования методами ЭПР-спектроскопии. В частности, Т. Такуи широко использует известный метод измерения частоты нутации Торри для определения суммарного электронного спина молекулы.

На конференции были представлены интересные теоретические работы в области квантовой динамики. Э. Б. Фельдман (Институт энергетических проблем химической физики РАН, г. Черноголовка) сделал доклад о теоретических разработках в области исследования спиновой динамики и спиновой декогеренции методами магнитного резонанса, а молодой учёный из КФУ, г. Казань, Е. И. Байбеков представил результаты расчётов нутации электронного спина в контексте квантовых вычислений.

Электронный парамагнитный резонанс широко применяется в химии и биологии. В области развития и применения импульсных протоколов ЭПР-экспериментов российские учёные внесли и продолжают вносить большой вклад. В последние годы наибольший прогресс достигнут в двух направлениях: синтез и освоение новых спиновых меток и разработка методов измерения расстояний в интервале 1.5–10 нм с помощью импульсных методов ЭПР. Исследования в этих направлениях вызывают наибольший интерес на конференциях. Наша конференция не стала исключением.

Способность ЭПР изучать живые организмы в их естественной среде предоставляет неоценимую возможность изучать биологические системы в естественных условиях. Исследование биологических систем в естественных условиях является интересным и важным со многих точек зрения. Необходимо определить структуру биологически важных молекул: ДНК, РНК, белков и т. д. Ещё важнее понять, как функционируют биологические системы.

Ответы на эти вопросы позволяют нам, например, найти причины заболеваний, связанных с молекулярными нарушениями в структуре и в ходе молекулярных процессов. На основании этих знаний можно отыскать способы лечения болезней. Изучая функционирование биологических и природных систем, возможно также получить весьма полезные идеи, например, как использовать углекислый газ, как разложить воду и т.д.

Довольно часто биологическая система состоит из диамагнитных молекул, и поэтому для исследования таких систем методами спектроскопии ЭПР применяется адресное введение спиновых меток. Комбинация методов спектроскопии ЭПР и спинового мечения даёт многообещающие перспективы в изучении структуры и функционирования биологических молекулярных систем.

Современный уровень науки в области спиновых меток был обрисован директором Новосибирского института органической химии СО РАН Е. Г. Багрянской в её пленарной лекции “Измерения расстояний при комнатных температурах с помощью импульсных методов ЭПР”.

Уместно отметить, что НИОХ СО РАН давно и прочно удерживает лидерство в синтезе стабильных спиновых меток-нитроксильных радикалов, а теперь тритильных. Именно синтезированные в этом институте тритильные радикалы позволили Е. Г. Багрянской с коллегами измерять расстояния в нанометровом масштабе и при температурах выше 80 К. На конференции были также представлены результаты весьма обстоятельного исследования бимолекулярного процесса спинового обмена в растворах нитроксильных радикалов, полученные совместными усилиями учёных КФТИ РАН (Казань) и НИОХ СО РАН (Новосибирск). К. М. Салихов (КФТИ РАН) представил последовательную теорию проявления в форме спектров ЭПР спинового обмена между спиновыми зондами в растворах. Перенос спиновой когерентности, вызванный обменным взаимодействием при столкновениях зондов, приводит к формированию коллективных мод квантовой спиновой когерентности. Показано, что спиновый обмен может служить хорошей иллюстрацией формирования организованного коллективного движения, вызванного случайными столкновениями молекул-спиновых зондов. При достаточно большой скорости переноса когерентности часть коллективных мод оказываются тёмными состояниями, которые не наблюдаются в ЭПР-эксперименте.

Пленарные лекции проф. Мартины Хюбер (Лейденский университет, Голландия) и проф. Роберта Биттла (Свободный университет, Берлин) были посвящены применению ЭПР-спектроскопии в биологии. Принято было считать, что функционально активные белки имеют совершенно определенную архитектуру, которая определяет их специфические свойства. Однако за последние 25 лет были открыты около 1500 неупорядоченных белков, которые способны по сложившимся обстоятельствам выполнять разные функции. Уже становится ясно, что такие неупорядоченные белки играют важнейшую роль в болезнях. Поэтому их изучение является крайне актуальной задачей. В своей лекции М. Хюбер продемонстрировала огромные возможности стационарных и импульсных методов ЭПР для исследования механизма биологически активного функционирования этих неупорядоченных белков. Были использованы методы традиционного анализа формы стационарных спектров ЭПР спиновых зондов. Импульсные методы двойного электронного парамагнитного резонанса были использованы для изучения взаимодействия неупорядоченных белков с мембранами. В качестве спиновых меток использовались стабильные радикалы и ионы железа, которые есть в биологических системах. Можно надеяться, что после этой конференции и в нашей стране начнется исследование неупорядоченных белков с помощью ЭПР.

Лекция Р. Биттла была посвящена исследованию молекулярного механизма фото-индуцированного восстановления флавина. Восстановление связано с переносом заряда. Задача состоит в том, чтобы выбрать правильные каналы реакции переноса электрона. Современные методы ЭПР дают возможность решать эту задачу. Это и продемонстрировал Р. Биттл в своей лекции.

Как всегда, были представлены интересные разработки по технике экспериментов по магнитному резонансу. Доктор К. Зик (фирма Брукер, Германия) представил два последних достижения фирмы Брукер, два новых датчика ЯМР спектрометра. Для экспериментов с вращением под магическим углом разработан датчик, который может вращаться с высокой угловой скоростью 111 кГц. Для экспериментов с применением градиента постоянного магнитного поля разработан датчик с градиентом поля 17 Т/м в интервале температур от –40 до +150 °С. Доктор Ф. Ши (Китай) с помощью магнитного резонанса зарегистрировал сигнал одиночного электронного парамагнитного центра N/V в алмазе.

Интерес вызвали доклады по развитию теории магнитного резонанса, по ядерной магнитно-резонансной томографии, а также результаты исследований наноструктур с помощью ядерного магнитного резонанса.

Особо можно отметить участие в работе конференции наших соотечественников, которые сейчас работают за рубежом. Проф. Г. Халиуллин (бывший сотрудник КФТИ РАН, ныне научный сотрудник института Макса Планка в Германии) представил очень содержательную пленарную лекцию о природе спин-орбитальной связи в соединениях рутения, о проявлении этой связи в свойствах этих соединений. Проф. В. Катаев (сотрудник КФТИ РАН по совместительству, заведующий лабораторией института общества Гельмгольца в Германии) в своём докладе рассказал о результатах своих исследований спиновой жидкости с помощью высокочастотной ЭПР-спектроскопии.

Доктор М. Цейтлин (бывший сотрудник КФТИ РАН, ныне работает в США) представил доклад об эффектах быстрого прохождения в форме спектров ЭПР. Важно то, что эти наши соотечественники вполне успешны в своей работе и поддерживают научные связи со своими коллегами здесь в России. У нас очень хорошие совместные работы с ними.

На основе докладов, включённых в программу конференции можно сделать вывод о том, что актуальные направления, обозначенные в программе, в настоящее время достаточно интенсивно развиваются в России. Степень влияния российских учёных на данные направления велика и адекватно оценивается мировым научным сообществом.

На конференции были представлены и результаты совместных исследований российских учёных и их зарубежных коллег. В целом конференция в научном отношении была на очень хорошем уровне, каждая работа вызывала жаркие дискуссии. Невозможно обо всех работах написать в кратком отчёте. Все участники конференции подчеркивали высокий научный уровень конференции.

К. М. Салихов, В. К. Воронкова

Двадцать первая Международная молодёжная научная школа “Когерентная оптика и оптическая спектроскопия”

XXI Международная молодёжная научная школа “Когерентная оптика и оптическая спектроскопия” проходила в Казани 17–19 октября 2017 года. Ректорат Школы в составе заведующего кафедрой оптики и нанофотоники КФУ, профессора, президента Академии наук РТ М. Х. Салахова (ректора Школы), заведующего лабораторией нелинейной оптики Казанского физико-технического института КазНЦ РАН, профессора, академика РАЕН В. В. Самарцева (проректора Школы) и профессора кафедры оптики и нанофотоники КФУ Д. И. Камаловой (учёного секретаря Школы) организовал подготовку и проведение Школы. В состав Программного комитета вошли: д.ф.-м.н., профессор Университета Аризоны, США, И. Р. Габитов – сопредседатель; д.ф.-м.н., профессор РАН, заместитель директора Института спектроскопии РАН А. В. Наумов – сопредседатель; д.ф.-м.н., профессор, академик АН РТ, зав. кафедрой оптики и нанофотоники КФУ, президент АН РТ М. Х. Салахов; д.ф.-м.н., профессор, зав. лабораторией нелинейной оптики КФТИ КНЦ РАН В. В. Самарцев; д.ф.-м.н., профессор КФУ Р. Х. Гайнутдинов.

Статус “международной” данная Школа приобрела из-за участия в ней китайской делегации из Юго-Восточного Джиатонгского университета провинции Сичуань (г. Ченгди) в составе его ректора – проф. П. Фана и проф. Школы информационной науки и технологии М. Зенга.

Были прочитаны лекции: “Электрон-фононное взаимодействие в примесных неупорядоченных твёрдых средах при низких температурах: микроскопическая природа и проявление в спектрах одиночных молекул” (проф. А. В. Наумов, ИСАН, Троицк, Москва); “Сканирующая зондовая микроскопия магнитных микро- и наноструктур” (проф. А. А. Бухараев, КФТИ КазНЦ РАН, Казань); “Оптические солитоны: путь длиною в 50 лет” (проф. С. В. Сазонов, НИЦ “Курчатовский институт”, Москва); “Электромагнитные волны в волноводах из необычных материалов” (проф. А. И. Маймистов, НИЯУ “МИФИ”, Москва); “Стохастические модели квантовой динамики пространственно разделенных широкополосных электромагнитных полей с нулевой плотностью фотонов, взаимодействующих между собой и резонансными атомами” (к.ф.-м.н., с.н.с. А. М. Башаров, НИЦ “Курчатовский институт”, Москва); “Квантовые вычисления и квантовая информатика и законы микромира (проф. Р. Х. Гайнутдинов, КФУ, Казань); “Нелинейная плазмоника тугоплавких материалов” (доцент С. С. Харинцев, КФУ, Казань); “Космическая и воздушная радиолокация наземных подвижных обьектов в режиме синтезирования апертуры антенны” (проф. А. Н. Леухин, МарГУ, Йошкар-Ола).

Информационные сообщения о проведении Школы были разосланы в университеты и научные центры городов России. Научные статьи для опубликования в материалах Школы рецензировались и редактировались. Программным комитетом были отобраны 57 докладов молодых учёных. Были решены организационные вопросы проведения лекционных и секционных заседаний, размещения, питания участников Школы. Заседания Школы проводились в конференц-зале Научной библиотеки им. Н. И. Лобачевского КФУ. География участников Школы охватывала города: Москва, Санкт-Петербург, Казань, Троицк, Саранск и другие. Общее число участников составило 65 человек, а включая слушателей из числа студентов КФУ – 76.

Работали следующие секции:
– нанооптика,
– проблемы квантовой оптики,
– оптическая спектроскопия,
– стендовая секция.

Научный уровень докладов молодых учёных свидетельствовал об их высокой квалификации. Секция “Нанооптика” была посвящена проблемам люминесцентной микро-

Выступление ректора Школы, проф. М. Х. Салахова на открытии Школы. В президиуме: руководитель института физики КФУ С. И. Никитин, проф. В. В. Самарцев, проф. А. В. Наумов.

Совместное фото с китайской делегацией. Слева направо: проф. А.Н. Леухин, проф. В.В. Самарцев, проф. П. Фан (Pingzhi Fan) и проф. М. Зенг (Ma Zheng).

скопии сверхвысокого разрешения одиночных полупроводниковых нанокристаллов, спектрофотометрии гибридных фотон-плазмонных кристаллов, исследованию углеродных аллотропов в защитном слое оптических волокон с помощью дальней и ближней спектроскопии комбинационного рассеяния света, а также исследованию модифицированных пористых мембран медицинского назначения методом атомно-силовой микроскопии и эффектов генерации локализованных нелинейно-оптических сигналов в плазмонных тугоплавких наноматериалах. Доклады на секции “Проблемы квантовой оптики” отражали результаты изучения некогерентного фотонного эха в ансамбле полупроводниковых коллоидных квантовых точек, гетеродинной схемы детектирования для системы квантовой коммуникации на боковых частотах. На секции “Оптическая спектроскопия” были представлены доклады, посвящённые исследованию флуоресценции ансамблей точечных квантовых излучателей в диэлектрической среде, эффектов локальных полей в оптических спектрах одиночных примесных молекул в твёрдых матрицах, фемтосекундной поляризационной спектроскопии молекулярной динамики в жидкости, а также изучению биомолекулярных жидкостей методом электрофоретического светорассеяния. На стендовой секции были представлены 40 стендовых докладов, отражающих современные проблемы квантовой оптики и квантовой информатики, люминесцентной и лазерной спектроскопии, нанооптики и наноплазмоники.

Среди молодых учёных был проведён конкурс на лучший доклад. По результатам конкурса шесть молодых участников были награждены дипломами за лучший доклад: А. Р. Хайдарова (КФУ) за доклад “Исследование модифицированных пористых мембран медицинского назначения методом атомно-силовой микроскопии”, Е. А. Черных (КФУ) за доклад “Фотоиндуцированный нагрев азополимерных плёнок”, Э. К. Непомнящая (Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого) за доклад “Особенности построения схемы регистрации рассеянного излучения в методе лазерной корреляционной спектроскопии при анализе

Проф. С. В. Сазонов (РНЦ “Курчатовский институт”) во время лекции.

Слушатели Школы. На первом плане – доцент КФУ С. С. Харинцев и проф. М. С. Тагиров.

биологических жидкостей”, А. С. Морозова (КФУ) за доклад “АСМ пленок GGG на поверхности кремния до и после взаимодействия с парами органических соединений”, М. А. Смирнов (КНИТУ-КАИ) за доклад “Использование ранжированных амплитуд для характеризации темновых отсчётов однофотонного лавинного фотодиода”, А. И. Аржанов (ИСАН, Троицк, Москва) за доклад “Некогерентное фотонное эхо в ансамбле полупроводниковых коллоидных квантовых точек: температурная зависимость обратного времени оптической дефазировки”.

На заключительном заседании 19 октября 2017 г. было принято Решение участников Школы, в котором были отмечены высокий научный уровень представленных дакладов и профессионализм молодых участников, выражена благодарность организационному и программному комитетам Школы за их усилия в обеспечении хороших условий для работы, а также благодарность Академии наук РТ, КФУ и РФФИ за оказанную финансовую поддержку.

М. Х. Салахов, профессор, ректор Школы;
В. В. Самарцев, профессор, проректор Школы;
Д. И. Камалова, профессор, учёный секретарь Школы

И вечный бой! Покой нам только снится

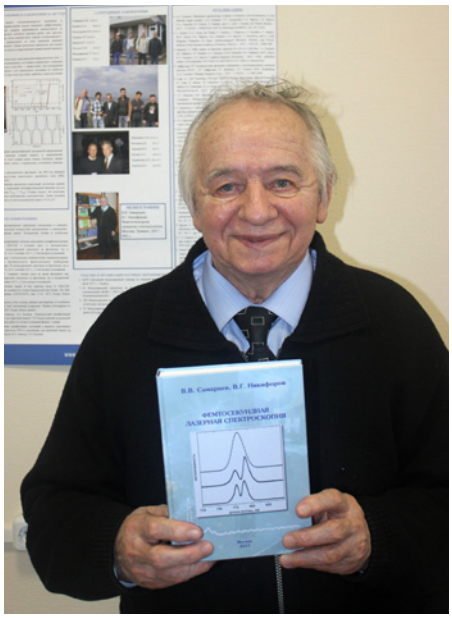
Снег. И мы беседуем вдвоём,
Как нам одолеть большую зиму.
Одолеть её необходимо,
Чтобы вновь весной услышать гром.
Господи, спасибо, что живём!

Э. А. Рязанов

Грустные мысли стали меня посещать последние три года, когда у меня в результате болезни появилась трость (чтобы было веселее, добавлю: “как у адмирала Нельсона на памятнике ему в Лондоне”). Я долго думал о себе, о своей жизни и решил, что мне ничего другого не остается, как активно жить: голова всё ещё соображает, а руки – пока работают!

Приободрило также приятное событие, которое со мной произошло в нашей библиотеке, где я увидел стенд, одна половина которого была почти полностью заполнена моими книгами и переводами англоязычных книг по квантовой оптике под моей редакцией. Я попросил Андрея Шкаликова сфотографировать меня “в обнимку” с этим стендом. Первая наша книга вышла в издательстве “Наука” в 1977 году, а последняя – в 2017 году, т.е. через 40 лет. Даже в тяжелейшие 80–90-ые годы нам посчастливилось издавать книги и проводить международные конференции. Профессор института теоретической физики РАН Ильдар Габитов, работающий ныне в США (в университете штата Аризона) на открытии нашей международной Школы “КООС-2016” сказал, что начав проводить эту Школу в лихие девяностые годы, мы совершили своего рода человеческий “подвиг”. То же самое можно сказать и о международном симпозиуме по фотонному эхо и когерентной спектроскопии (ФЭКС), который мы смогли возобновить (после 1973 года) лишь в 1981 году, и то благодаря академику Л. В. Келдышу, согласившемуся стать председателем оргкомитета ФЭКС-1981, на что профессор МГУ Владимир Днепровский мне заметил, что я “вытащил счастливый билет”. Недавно, в 2017 году, в Светлогорске Калининградской области состоялся уже одиннадцатый международный симпозиум ФЭКС-2017, который я “открывал” по скайпу. И, наконец, в июле 2017 года в гостинице “Корстон” в Казани состоялась международная конференция “LPHYS-2017”, ранее проводившаяся в основном за рубежами России. Одним из основных организаторов этой крупной международной конференции по лазерной физике был наш институт, заслуги которого в развитии когерентной и квантовой оптики общепризнаны.

В. В. Самарцев у стенда с книгами в библиотеке КФТИ.



Профессор В. В. Самарцев с книгой, изданной в 2017 году.

Супруги Самарцевы вместе 50 лет!

Книги на стенде нашей библиотеки с моим соавторством были трёх типов: русскоязычные, англоязычные и наши переводы выдающихся англоязычных книг по квантовой оптике и квантовым вычислениям. Среди четырёх моих англоязычных книг выделю монографию 2015 года: V. V. Samartsev “Correlated photons and their applications” (Cambridge (UK): CISP, 2015. –218 p.), а среди наших переводов четырёх англоязычных книг отмечу следующие: Л. Мандель, Э. Вольф “Оптическая когерентность и квантовая оптика” (М.: Физматлит, 2000. –896 с.) и Л. Новотный, Б. Хехт “Основы нанооптики” (М.: Физматлит, 2009. –484 с.). Среди русскоязычных книг отмечу известную монографию Э. А. Маныкина, В. В. Самарцева “Оптическая эхо-спектроскопия” (М.: Наука, 1984. – 280 с.), монографию С. В. Петрушкина, В. В. Самарцева “Лазерное охлаждение твёрдых тел” (М.: Физматлит, 2005. –224 с.) и монографию этого года В. В. Самарцева, В. Г. Никифорова “Фемтосекундная лазерная спектроскопия” (М.: Тровант, 2017. –401 с.). Принимая во внимание год, которому посвящён данный Ежегодник, я счёл уместным поместить здесь мою фотографию именно с этой книгой 2017 года издания. Каждая из этих книг далась нам очень тяжело. Вспоминается песня Олега Газманова “Дороги, дороги” о том, что, когда он в конце пути смертельно устанет и упадёт, то он надеется, что память о нём останется в его песнях. Так и я надеюсь, что память обо мне останется в моих книгах.

Я благодарен за совместный труд всем моим соавторам, а за последнюю книгу – В. Г. Никифорову за его вклад в неё. Благадарю также своих родителей, особенно, – маму. Хочу сказать спасибо ещё одному человеку – моей жене Валентине Александровне Самарцевой, с которой мы в браке 50 лет. 23 декабря 2017 года у нас был юбилей бракосочетания. Спасибо ей за любовь и терпение! Мой друг, профессор С. П. Кулик из МГУ, отметил, что в его кругу такой юбилей – крайне редкое событие. Поэтому я запечатлел его на фото, чтобы сделать из него праздник. Жизнь на склоне лет – нелёгкая. Она напоминает движение супругов в снегопад. Начал я эту статью со стихов Э. А. Рязанова, ими и закончу:

Мы выходим вместе в снегопад.
И четыре оттиска за нами,
Отпечатанные башмаками,
Неотвязно следуя, следят.
Господи, как я метели рад!

В. В. Самарцев

Премия им. М. Л. Блатта 2017

Премия им. М. Л. Блатта для работников вспомогательных подразделений КФТИ КазНЦ РАН за доброжелательное отношение к научным работникам и добросовестный многолетний труд вручается уже семнадцатый раз и в этом году была присуждена Учёным советом КФТИ ведущему редактору редакционно-издательской группы Ахмину Сергею Михайловичу.

Сергей Михайлович Ахмин

Общий стаж работы Сергея Михайловича Ахмина в нашем институте около 30 лет, не считая трёх лет аспирантуры. После окончания аспирантуры в 1988 году он был принят на работу в лабораторию ЭПР ТТ КФТИ младшим научным сотрудником. В декабре 1990 года успешно защитил кандидатскую диссертацию по результатам исследования электронно-ядерных взаимодействий примесных парамагнитных ионов в кристаллах хлоридов методом ДЭЯР. С 1990 по 1992 г. Ахмин С.М. успешно сочетает основную научную работу с работой научного редактора журнала “Applied Magnetic Resonance”. С февраля 1993 г., с момента выделения редакции журнала “AMR” в самостоятельное подразделение, работает в должности научного редактора журнала, а с марта 1996 года – зам. главного редактора журнала по производственным вопросам. В 1993 г. Ахмин С.М. подготовил, а затем блестяще реализовал проект по производству журнала силами редакции “AMR”. Им была проведена закупка необходимого оборудования, подбор программных средств для современной издательской системы, освоена сложная технология обработки графического и текстового материала на уровне самых высоких полиграфических требований. С 1994 г. вся допечатная подготовка журнала “AMR” осуществлялась в КФТИ. Непосредственной заслугой Сергея Михайловича является получение КФТИ лицензии на издательскую деятельность. С 2000 года все подготовленные в КФТИ издания выходят в издательстве Физтхпресс. Специалисты Физтхпрес востребованы в совместных проектах с другими издательствами города, среди партнёров Ахмин С.М. является признанным дизайнером в полиграфии. С 2013 года Ахмин С.М. трудится в должности ведущего научного редактора редакционно-издательской группы.

Научные сотрудники в основном общаются с Сергеем Михайловичем во время подготовки статей в Ежегодник КФТИ, в различные буклеты. Его замечания по корректуре всегда тактичны и обоснованы. Иногда предлагаемый им вариант намного лучше авторского. Он коммуникабелен, к нему всегда можно обратиться за помощью и консультацией.

Многогранность интересов, высокий профессиональный уровень, стремление делать своё дело с максимально возможным результатом и качеством и благожелательное отношение к научным работникам отличали и Михаила Львовича Блатта, именем которого названа премия. Можно сказать, что Сергей Михайлович Ахмин есть Блатт нового времени.

Поздравляем Сергея Михайловича, благодарим за многолетнюю квалифицированную работу, чуткое и доброжелательное отношение к сотрудникам института. Желаем крепкого здоровья и благополучия.

От имени научных сотрудников КФТИ

В. Н. Лисин,
председатель комитета по присуждению
премии им. М. Л. Блатта

Международная премия им. Е. К. Завойского 2017

Международная премия им. Е. К. Завойского учреждена в 1991 году. Эта премия получила поддержку Казанского физико-технического института им. Е. К. Завойского, Казанского (Приволжского) федерального университета, Правительства Республики Татарстан и издательства Шпрингер (Вена Нью Йорк), которое сотрудничает с Казанским физико-техническим институтом в издании международного журнала “Applied Magnetic Resonance”. Премия получила признание Амперовского общества, Международного общества ЭПР (ЭСР) и Президиума РАН. Она получила высокую международную оценку как значительная премия за научные достижения.

Премия им. Е. К. Завойского присуждается за выдающийся вклад в применения или развитие электронного парамагнитного резонанса в любой области науки. Лауреат получает диплом, медаль и денежный чек на 5000 евро (1500 евро от издательства Шпрингер Вена Нью Йорк и 3500 евро от Правительства Республики Татарстан). Лекция лауреата о своей работе публикуется в журнале “Applied Magnetic Resonance”. Церемония вручения премии проходит в Казани, где лауреат и его(её) супруга(супруг) являются почётными гостями Правительства Республики Татарстан.

Церемония вручения этой престижной премии в 2017 году проходила в традиционном формате. Лауреат был выбран международным комитетом в следующем составе: К. М. Салихов (Казань, Россия), председатель, и члены: Данте Гаттески (Флоренция, Италия), К. Мёбиус (Берлин, Германия), Дж. Х. Фрид (Итака, США), и Б. М. Хоффман (Чикаго, США). В начале 2017 года комитет обратился примерно к 50 самым авторитетным специалистам в области ЭПР с письменной просьбой назвать кандидата. Одновременно объявление о приёме выдвижений было опубликовано в Амперовском бюллетене и “EPR newsletter”, официальном органе Международного общества ЭПР (ЭСР). Были рассмотрены все кандидатуры, названные до 1 апреля 2017 года. В результате широкого обсуждения всех кандидатур решение комитета было единодушным – премию 2017 получил профессор Такеджи Такуи (Университет Осаки, Осака, Япония).

Проф. Такеджи Такуи, лауреат Международной премии им. Е. К. Завойского.

Лауреат был отмечен за выдающийся вклад в развитие органических молекул с высоким спином и открытой оболочкой и их квантовой спиновой технологии на основе ЭПР.

За двадцать шесть лет существования этой премии, высокого звания лауреата были удостоены 33 выдающихся

Слева направо: А. А. Калачёв, И. Р. Гафуров, Т. Такуи, М. Х. Салахов, К. М. Салихов, Э. Н. Фаттахов.

учёных из разных стран мира (в 1994 году, в ознаменование 50-летней годовщины открытия ЭПР, было названо три лауреата, в 2004 году, в ознаменование 60-летней годовщины открытия ЭПР, было названо два лауреата, в 2014 году, в ознаменование 70-летней годовщины открытия ЭПР, было названо два лауреата, в 2015 и 2016 году тоже два лауреата), среди них три представителя России – проф. Я. С. Лебедев, проф. В. А. Ацаркин и наши земляки, акад. К. А. Валиев и акад. К. М. Салихов, а также фирма Брукер БиоСпин.

Вручение премии им. Е. К. Завойского является значительным событием в культурной жизни Республики Татарстан и сопровождается рядом мероприятий. К церемонии вручения приурочивается ежегодная международная конференция “Современные достижения магнитного резонанса”. В 2017 году она проходила в период с 25 по 29 сентября. Церемония вручения премии проходила 31 сентября в здании Академии наук Республики Татарстан. В ней участвовали докладчики конференции, а также учёные и студенты университетов и научно-исследовательских институтов Казани. Председатель Международного комитета по вручению премии им. Завойского академик К. М. Салихов объявил решение комитета. Заместитель Премьер-министра Республики Татарстан Энгель Навапович Фаттахов вручил профессору Такеджи Такуи диплом лауреата, медаль и денежный чек, и поздравил его. Лауреата тепло поздравили президент АН РТ проф. М. Х. Салахов, ректор К(П)ФУ проф. И. Р. Гафуров, президент Международного общества ЭПР (ЭСР) проф. Х. Охта, член Международного комитета AMPERE проф. В. А. Ацаркин, председатель Азиатско-Тихоокеанского общества ЭПР проф. Е. Г. Багрянская. Лауреату были переданы поздравления от имени издательства Шпрингер, и президента Международного общества магнитного резонанса проф. Д. Гольдфарб.

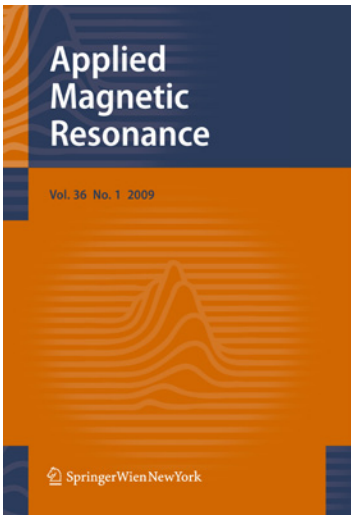
Профессор Т. Такуи сделал доклад “Топологическая высокоспиновая органическая химия и молекулярная спин-кубитовая квантовая технология, основанная на данных электронного магнитного резонанса”.

Торжественное собрание сопровождалось выступлением струнного квартета “Кантилена”.

Во время своего пребывания в Казани лауреат посетил музей истории К(П)ФУ, где экспонируется экспериментальное оборудование Е. К. Завойского, и достопримечательности Казани.

Л. В. Мосина,
учёный секретарь комитета
по присуждению премии им. Е. К. Завойского

Журнал “Applied Magnetic Resonance”



Международный журнал “Applied Magnetic Resonance” – один из первых научных журналов в нашей стране, печатающийся на английском языке и посвящённый приложениям магнитного резонанса в физике, химии, биологии, медицине, геохимии, экологии и т.д.

Журнал создан по инициативе акад. К. М. Салихова при поддержке РАН. Издаётся с 1990 года.

Редакция журнала расположена в КФТИ КазНЦ РАН. Издателем журнала является издательство Шпрингер (Вена Нью Йорк), расположенное в Вене, Австрия.

В 1990 году выпущен один том (три выпуска), в 1991 году выпущен один том (четыре выпуска), в 1992 году выпущен один том (шесть выпусков), с 1993 по 2012 год выпускалось два тома (четыре выпуска каждый), а с 2013 года ежегодно, регулярно и с высоким качеством, удовлетворяющим требованиям международной научной общественности и издательства Шпрингер, выпускается один том (двенадцать выпусков).

Impact factor журнала: 2016 – 0.864.

Журнал индексируется в Science Citation Index, Science Citation Index Expanded (SciSearch), Journal Citation Reports/Science Edition, SCOPUS, INSPEC, Chemical Abstracts Service (CAS), Google Scholar, Academic OneFile, Current Contents/Physical, Chemical and Earth Sciences, EI-Compendex, Gale, GeoRef, INIS Atomindex, OCLC, Referativnyi Zhurnal, SCImago, Summon by Serial Solutions.

“Applied Magnetic Resonance” публикует оригинальные статьи, предпочтительно по новым приложениям техники магнитного резонанса и по новым экспериментальным методам. Рутинные приложения в структурной химии находятся вне тематики журнала. Журнал печатает приглашённые обзорные статьи по методам и приложениям

ЯМР, ЯКР, ЭПР, мёссбауэровской спектроскопии и т.д. Публикуются специальные выпуски под редакцией известных учёных, посвящённые актуальным проблемам магнитного резонанса.

“Applied Magnetic Resonance” опубликовал специальные выпуски оригинальных статей, подготовленных в рамках Амперовских конгрессов, а также ряда специализированных Амперовских симпозиумов и международных конференций.

В 2017 году редакцией подготовлен 48-й том журнала, состоящий из двенадцати выпусков. Среди них – специальный выпуск, посвящённый новым аспектам физики магнитного резонанса и его применений (гостевые редакторы профессора Владимир И. Чижик (Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург) и Мурат С. Тагиров (Казанский федеральный университет, Казань). Два выпуска журнала были посвящены профессору Джеймсу С. Хайду в связи с 85-летием со дня его рождения (гостевые редакторы профессора Гарет Р. Итон и Сандра С Итон (оба Университет Денвера, Денвер, Колорадо, США), и Майкл К. Боуман (Университет Алабамы, Тускалуза, Алабама, США). Рассмотрено развитие электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) и магнитно-резонансной томографии (МРТ) за шесть десятилетий с акцентом на вклад Джеймса С. Хайда. В течение двадцати лет он возглавлял коммерческие разработки ЭПР, а затем более сорока лет возглавлял разработку аппаратуры и биомедицинских применений ЭПР в Медицинском колледже штата Висконсин, США. Именно там он также внес большой вклад в МРТ и особенно функциональную МРТ. Коллекция статей, написанных коллегами Дж. Хайда из Германии, Израиля, России, Швейцарии и США, наглядно демонстрирует успехи в этой области.

Л. В. Мосина,
заместитель главного редактора

“EPR newsletter”: 15 + и новые рубежи Казанской редакции издания

“EPR newsletter”, официальный орган международного общества ЭПР (ЭСР) (www.ieprs.org) (МОЭ), объединяющего более тысячи учёных, применяющих метод ЭПР в своих исследованиях, представляет своим читателям актуальную информацию о жизни МОЭ, различных премиях и юбилеях, новых книгах и журналах, компьютерных программах и методах, экспериментальных ноу-хау, объявления и отчёты о локальных и международных конференциях, объявления о вакансиях и желающих найти работу, информацию о продаже и обмене оборудования, а также рекламу спонсоров [1].

Электронная версия вестника размещается на 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. В конце 2002 года по решению МОЭ редакция “EPR newsletter” была переведена из Центра ЭПР в Милуоки (Висконсин, США) в Казанский физико-технический институт КазНЦ РАН.

2017 год, год нашего пятнадцатилетия, прошёл в интенсивной работе всего коллектива и ознаменовался выпуском двойного номера [2] и двух одиночных выпусков [3, 4]. Предлагаю читателям Ежегодника КФТИ совершить совместное путешествие по страницам нашего издания.

Мы начинаем со статьи Кристофа Бёме, лауреата Серебряной медали МОЭ 2016 [2, с. 3, 4], который рассказал об истории его взаимодействия с EDMR – электрически детектируемым магнитным резонансом. EDMR – чрезвычайно мощный метод, когда речь идет об изучении того, что делает оптоэлектронные свойства материала такими, какие они есть. Этот метод очень чувствителен, в конечном счёте, он позволяет обнаруживать отдельные спины, тем не менее, он также по своей природе “слеп” к парамагнитным центрам, которые не влияют на проводимость материала. Приятным было и знакомство с его группой исследователей в Университете Юты.

В развитие колонки Awards, мы представили слово представителям двух поколений: Джорджу Катсейлу (премия Улдерико Сегре 2016) и Шоко Оказаки (Премия Общества спиновой науки и технологии для молодых учёных 2016), и Майклу Боуману и Арнольду Райцимрингу (Международная премия им. Завойского 2016) [2, с. 5–10].

Марина Брустолон, Данте Гаттески и Анжело Альберти представили хотя и не исчерпывающий, но реалистичный отчёт о зарождении, росте и создании спектроскопии ЭПР в Италии [2, с. 13–24]. Они попросили ведущих учёных из основных групп и лабораторий ЭПР в Италии написать историю об использовании и развитии спектроскопии парамагнитного резонанса в своих университетах и исследовательских центрах. Результат поистине впечатляет! Предполагаю, что заинтересованный читатель не поленится прочитать и истории об ЭПР в Австралии (18/2-3, с. 24–30). Аргоннской национальной лаборатории (19/3, с. 16–22), Словении (20/1, с. 12–14), Израиле (20/2-3, с. 14-22), Греции (21/1, с. 8–12) и Японии (24/3, с. 7–9).

Кончина Эрвина Хана (1921–2016), отца спинового эха, заставила нас остановиться и задуматься о том,

чем магнитный резонанс в общем и ЭПР в частности обязаны этой замечательной и динамичной личности. Колонка In Memoriam, посвящённая памяти великого учёного, представила ретроспективу его достижений [2, с. 25–30]. Бернхард Блюмих, президент Амперовского общества, отметил, что, несмотря на то, что Эрвин Хан больше всего известен открытием явления эха, он внёс и другие оригинальные открытия в стандартный репертуар современной науки. Джон Пилброу поделился воспоминаниями о личных встречах с Эрвином Ханом, а Чарли Слихтер рассказал о дружбе с Эрвином Ханом продолжительностью в шестьдесят восемь лет. Наши читатели могут ознакомиться со статьями Эрвина Хана в различных номерах “EPR newsletter”, которые прекрасно иллюстрируют его потрясающую индивидуальность и разнообразные таланты. Мы глубоко признательны ему за сотрудничество.

Все мы знали о 50-й юбилейной ежегодной международной конференции группы ЭСР Королевского общества по химии, которая состоялась в апреле 2017 года в Оксфорде, Великобритания. Это одно из главных событий в жизни сообщества магнитного резонанса, на котором также вручают премию фирмы Брукер, премию фирмы Брукер для молодых учёных и премию фирмы JEOL. Поэтому неудивительно, что мы подготовили “EPR newsletter” с соответствующими колонками, ориентированными на это событие [3].

Просто замечательно, что Эрик МакИннес, председатель комитета группы ЭСР Королевского общества по химии, и члены комитета поддержали эту идею и внесли большой вклад в создание этого номера: интервью с Питером Хёфером, лауреатом премии фирмы Брукер 2017; истории успеха Андрина Долла, лауреата премии фирмы Брукер для молодых учёных 2017 (см. также 22/4, с.18) и Джейсон Сидабраса, JEOL Prize 2017; поздравление Дэвида Коллисона с его 65-летним юбилеем; статья Николаса Чилтона о новом программном обеспечении и доклад Ильи Купрова об этой конференции; представление когорты блестящих молодых учёных – Кристоса Плиосаса, Криса Клина, Макси Розслер, Николаса Чилтона и Эммы Ричардс, а также книги “Электронный парамагнитный резонанс”, написанный В. Чечиком, Э. Картер и Д. Мерфи.

Несомненно, доставит удовольствие чтение статьи “Оглядываясь назад – как исследования методом ЭПР проводились 65 лет назад” Харви А. Букмастера. Такие статьи являются драгоценными свидетельствами истории ЭПР, неоценимыми для молодого поколения исследователей.

Празднование 50-го юбилея ежегодной международной конференции группы ЭСР Королевского общества по химии было продолжено опубликованием статьи об истории этих конференций, написанной Лесом Сатклиффом, почётным членом МОЭ [4, с. 10–13]. В отчёте о годовом общем собрании МОЭ [4, с. 3–5] обобщается разнообразная деятельность МОЭ в 2017 году и подчеркиваются проблемы, которые необходимо решить. В колонке Anniversaries отмечаются праздники родственных обществ: статьи о 25-летии Европейской федерации групп ЭПР (Сабина Ван Доорслаер) [4, с. 6, 7] и 15-летии Общества спиновой науки и технологии (Тосикадзу Накамура) [4, с. 7, 8] охватывают соответствующие периоды истории и определяют ключевые проблемы, с которыми сталкиваются эти общества. Воодушевляет то, что оба общества демонстрируют намерения сотрудничать с МОЭ.

Сотрудничество с командой замечательных коллег: членами правления МОЭ; помощниками редактора Кандис Клуг (Северная и Южная Америки) (также колонка New EPR Faculty), Хитоши Охта (Азиатско-тихоокеанский регион), and Сабина Ван Доорслаер (Европа) (также колонка Present Meets Present); редакторами колонок Кис Эрл (колонка Tips and Techniques), Вольфганг Любитц (колонка Guest of the Issue), Джон Пилброу (колонка “EPR newsletter” Anecdotes), и Штефан Штоль (колонка Software); техническим редактором Сергеем Ахминым; Евгеном Полыгачем, вебмастером; и Скоттом Мортоном (типография “Печатное Дело ЛаПлум и Сыновья”) свидетельствует о том, что пятнадцатилетняя Казанская редакция готова к покорению новых вершин. Следите за новыми номерами на нашем сайте www.eprnewsletter.ethz.ch!

Литература

1. Мосина Л.В.: Казанский физико-технический институт имени Е. К. Завойского 2016. Ежегодник (Салихов К.М., ред.), с. 211–212. Казань: КФТИ 2017.
2. EPR Newsletter 27, no. 1-2 (2017)
4. EPR Newsletter 27, no. 3 (2017)
5. EPR Newsletter 27, no. 4 (2017)

Л. В. Мосина,
главный редактор

Репортаж с торжественного заседания, посвящённого проводам Старого и встрече Нового 2018 года

К концу подходил 2017 год, в этом году были свои сложности и перемены, были свои успехи и достижения, но одно оставалось неизменным – это добрая традиция провожать уходящий год и встречать новый с большими надеждами и планами. Именно для этого большинство сотрудников нашего института собрались 28 декабря в актовом зале.

Перед торжественным заседанием каждый желающий мог сфотографироваться с Дедом Морозом, роль которого в очередной раз с большим успехом сыграл Артемий Шмелёв, научный сотрудник лаборатории быстропротекающих молекулярных процессов. Стоит отметить, что Дедушка Мороз оказался достаточно продвинутым и разбирался в новых технологиях, поэтому неудивительно было его увидеть не с новогодним посохом, а со селфи-палкой.

Торжественное заседание открыл директор Физтеха, Алексей Алексеевич Калачёв. Поздравив сотрудников с наступающим Новым годом, он отметил ряд важных событий, произошедших в жизни нашего института в уходящем году. А. А. Калачёв рассказал о “Неделе Завойского”, которая была посвящена 110-летию со дня рождения Евгения Константиновича, о том, как прошла международная конференция “Modern Development of Magnetic Resonance”, а так же о лауреатах премии им. Е. К. Завойского, где особо отметил нашего научного сотрудника лаборатории проблем сверхпроводимости и спинтроники Андрея Камашева, получившего молодёжную премию им. Е. К. Завойского. Алексей Алексеевич отметил и другие конференции, в организации которых наш институт принимал непосредственное участие. Всего институт принял участие в организации четырёх международных конференций, самая крупная из которых – “Laser Physics”. От имени коллектива института А. А. Калачёв поздравил Кева Минуллиновича Салихова, который в 2017 году был награждён Орденом “За заслуги перед Отечеством” III степени. Далее были отмечены победители конкурсов РФФИ и РНФ, а также сотрудники, защитившие диссертации.

В завершение Алексей Алексеевич рассказал о Мегагранте, который получил наш институт, о заседании Совета при Президенте РТ по образованию и науке, об этапах реорганизации Казанского научного центра Российской Академии наук и создании Федерального ис-

Сотрудники института на новогоднем заседании 28 декабря 2017 года.

Фото на память с Дедом Морозом.

следовательского центра, в состав которого вошёл наш институт. Несмотря на то, что перемены всегда сопряжены со сложностями, Алексей Алексеевич призвал всех с оптимизмом смотреть в будущее и с долей юмора завершил своё выступление замечательными словами Джона Эрнста Стейнбека: “Самое удивительное в будущем – это мысль о том, что наше время будут называть старыми добрыми временами”.

Торжественную часть продолжил дуэт ведущих в лице Ивана Яцыка, научного сотрудника лаборатории спиновой физики и спиновой химии, и Валерии Воробьёвой, младшего научного сотрудника лаборатории молекулярной радиоспектроскопии. Неожиданно для всех они предложили провести выборы. На сцену были приглашены Дед Мороз (Артемий Шмелёв) и Кощей Бессмертный (Дмитрий Жарков, младший научный сотрудник лаборатории быстропротекающих молекулярных процессов), которые выдвигали свои кандидатуры одновременно на пост директора ФИЦ КазНЦ РАН и президента РФ. Сотрудникам было предложено проголосовать за указанных кандидатов, и разделить два поста между двумя кандидатами. В конце торжественного заседания были оглашены результаты шуточного голосования.

Далее ведущие поздравили наших юбиляров, а затем и ветеранов института, которые верой и правдой продолжают служить Физтеху и всей науке. Ветеранов Физтеха поздравили председатель профкома КФТИ Рушана Михайловна Ерёмина и член профкома КФТИ Сергей Глебович Львов. Стоит отметить, что юбиляров и ветеранов оказалось достаточно много – вот таким вышел “юбилейным” 2017 год. Премия им. М. Л. Блатта была вручена Сергею Михайловичу Ахмину.

А. А. Калачёв поздравляет Валерию Воробьёву с защитой диссертации.

Шуточные выборы. На сцене – Дед Мороз и Кощей Бессмертный.

Р. М. Ерёмина и С. Г. Львов вручают почётные грамоты и бессрочные удостоверения сотрудника КФТИ ветеранам КФТИ.

От юбиляров и ветеранов ведущие торжества плавно перешли к новым сотрудникам и молодежи. К большому разочарованию, ряды нашего института пополнили всего один студент и один аспирант. Но не будем расстраиваться, а будем надеяться, что в Новом 2018 году от молодых специалистов не будет отбоя. Они будут брать пример с наших молодых призёров и лауреатов: Дмитрия Акатьева, аспиранта лаборатории нелинейной оптики – лауреата именной стипендии КФТИ, Андрея Камашева – лауреата молодежной премии им. Е. К. Завойского в области физики и Рамиля Кашапова, научного сотрудника лаборатории радиационной физики – победителя конкурса 2017 г. гранта Президента РФ для к.н. в области знаний “Технические и инженерные науки”.

Для разрядки зала аспирантом лаборатории физики углеродных наноструктур и композитных систем Ранисом Фатыховым был прочитан небольшой шуточный стишок. Далее слово было передано председателю СМУ КФТИ

Дмитрия Акатьева, аспиранта лаборатории нелинейной оптики, лауреата именной стипендии КФТИ им. Б. М. Козырева, поздравили Дед Мороз и директор института.

Председатель СМУ Линар Гафиятуллин вручает почётную грамоту Сергею Хантимерову, удостоенному звания “Спортсмен года”.

Шуточный конкурс “Мумия”.

Линару Гафиятуллину, младшему научному сотруднику лаборатории молекулярной радиоспектроскопии, который перешёл к спортивной жизни института, поздравил и вручил почётные грамоты победителям и призёрам по лыжным гонкам, велокроссу, волейболу и настольному теннису. Спортсменом года 2017 г. Советом молодых учёных был выбран Сергей Хантимеров (старший научный сотрудник лаборатории физики углеродных наноструктур и композитных систем), капитан сборной КазНЦ РАН по волейболу, который также был отмечен в номинации “Самый ценный игрок” в ранее проведённом кубке по волейболу.

Спортивная часть завершилась шуточным конкурсом “Мумия”, где две пары участников (первая пара – Альбина Сиафетдинова и Артемий Шмелёв, вторая пара – Рушана Михайловна Ерёмина и Руслан Зарипов), не выявив победителя, завершили конкурс, как говорится, дружбой.

По традиции, торжественный вечер завершился гимном КФТИ, после чего сотрудников ждал небольшой фуршет с шампанским, мандаринами и конфетами. Затем официальная часть торжества плавно перетекла в Новогоднюю дискотеку, руководил которой новоиспечённый диджей Ранис Фаттыхов, уже упомянутый аспирант лаборатории физики углеродных наноструктур и композитных систем.

Торжественный вечер (подготовка программы, создание презентации, праздничное оформление, музыкальная и техническая поддержка) и дискотека были организованы силами Совета молодых учёных КФТИ при активном участии всех молодых учёных и аспирантов института, профкома и дирекции КФТИ. Фотографии предоставлены Иваном Яцыком.

Л. Г. Гафиятуллин,
Т. П. Гаврилова, И. В. Яцык

СМИ о сотрудниках института

В КФУ молодым учёным вручили премию Завойского[1]

В Казанском федеральном университете вручили XX Казанскую премию имени Е. К. Завойского среди молодых учёных. Церемония состоялась в Музее истории Казанского университета 28 сентября, в день 110-летия физика. Премия была учреждена в 1997 году, когда отмечался 90-летний юбилей учёного, первое же награждение состоялось в 1998-м. И тогда первым лауреатом премии им. Е. К .Завойского стал Дмитрий Таюрский, который сейчас является проректором КФУ по образовательной деятельности. Очень символично, что именно он сегодня поздравлял победителей и финалистов двадцатого по счёту конкурса на соискание премии им. Е. К. Завойского, которая вручается за значительные достижения в экспериментальной, теоретической и прикладной физике.

Дмитрий Альбертович напомнил о том, что Казань – город студенческий и что именно здесь должна процветать наука. Он пожелал молодым учёным развивать науку в нашей стране, продолжать дело, начатое Завойским. Прозвучало также поздравление в адрес участников конкурса от почётного гостя церемонии профессора Инсбрукского университета, директора Института квантовой оптики и квантовой информатики Австрийской академии наук Рудольфа Гримма, который является спикером Международного научного совета КФУ. А заместитель председателя экспертной комиссии по присуждению премии им. Е. К. Завойского среди молодых учёных, профессор КФУ Альберт Аганов рассказал о её истории и о том, почему премия, которая вначале давалась только за исследования в области электронного парамагнитного резонанса, открытого в 1944 году в стенах Казанского университета Евгением Завойским, со временем приобрела более “всеобъемлющий” характер. Теперь её вручают

не только за научные изыскания в области физики, но и за исследования на стыке наук. Отдельная номинация посвящена техническим и технологическим разработкам, направленным на решение актуальных задач промышленного производства.

В этом году победителями конкурса стали сразу два молодых физика: ассистент кафедры общей физики, младший научный сотрудник Центра квантовых технологий КФУ Нияз Бейсенгулов и сотрудник КФТИ КазНЦ РАН Андрей Камашев. Диплом второй степени и специальный приз за прикладную работу получил младший научный сотрудник НИЛ “СВЧ-проектирование и радиотелекоммуникации” КФУ Амир Сулимов. Диплома третьей степени удостоен Дмитрий Блохин – ассистент кафедры медицинской физики и старший научный сотрудник НИЛ “Структурная биология” КФУ. Кроме того, были награждены финалисты конкурса: Анастасия Петрова (КФУ), Антон Семенников (КГЭУ), Антон Харитонов (КФУ) и Абдулрахман Мохаммед Ба Бараик (КГЭУ).

[1] Статья размещена на сайте “Известия Татарстана” (http://www.tatarnews.ru/shortnews/13408). 29 сентября 2017 г.

В Казани профессору из Японии вручили международную премию имени Е. К. Завойского[2]

Сегодня в Академии наук Татарстана состоялась церемония вручения международной премии имени Е. К. Завойского. В этом году премия присуждена почётному профессору Университета Осаки (Япония) Такеджи Такуи за выдающийся вклад в развитие высокоспиновых молекулярных магнетиков и их исследования методом электронного парамагнитного резонанса.

Открывая торжественное мероприятие, президент Академии наук РТ Мякзюм Салахов отметил, что 28 сентября исполнится 110 лет со дня рождения Евгения Завойского. Он напомнил, что премия имени выдающегося физика была учреждена в 1991 году и с тех пор её лауреатами стали более 30 исследователей из разных стран. “Фактически за это время она стала престижной международной премией, которая ценится во всем мире и выполняет свою задачу – признания крупных достижений в тех областях знаний, у истоков которых стоял наш выдающийся учёный Евгений Константинович Завойский”, – подчеркнул М. Салахов.

От имени Правительства Татарстана и научного сообщества республики собравшихся поприветствовал глава Минобрнауки РТ Энгель Фаттахов. “Сегодня мы собрались, чтобы почтить память нашего выдающегося соотечественника Евгения Константиновича Завойского и наградить его последователя в области изучения и применения электронного парамагнитного резонанса. Ежегодное вручение премии имени Завойского стало знаковым событием в культурной и научной жизни республики и её столицы – Казани, имеющей замечательные научные традиции”, – сказал вице-премьер.

С заслуженной наградой профессора Такеджи Такуи поздравил ректор К(П)ФУ Ильшат Гафуров. “Эта премия сегодня дает старт следующему году, который объявлен Годом Японии в России. Будет проходить много мероприятий. Надеюсь, что коллеги будут работать и на наших площадках. Для нас это важно, поскольку Казанский университет сегодня вплотную сотрудничает со многими японскими университетами”, – заявил он.

Премия имени Е. К. Завойского присуждается за выдающийся вклад за применение или развитие электронного парамагнитного резонанса в любой области науки. Лауреат получает диплом, медаль и денежное вознаграждение в размере 5 тыс. евро, в частности, 1.5 тыс. евро от издательства Springer (Вена – Нью-Йорк) и 3.5 тыс. евро

от Правительства РТ. Лекция лауреата о своей работе публикуется в журнале “Applied Magnetic Resonance”.

В прошлом году премию имени Е. К. Завойского получили Майкл Боуман (Алабама, США) и Арнольд Райцимринг (Аризона, США). Они были отмечены за выдающийся вклад в изучение импульсного ЭПР и его приложений в радиационной химии и молекулярной биофизике.

Такеджи Такуи применил современную спектроскопию электронного парамагнитного резонанса в области молекулярной химии и материаловедения, а также в недавно развитой междисциплинарной области исследований органических молекулярных магнетиков, основанной на высокоспиновой химии. Профессор признан одним из мировых лидеров в области электронной спиновой науки, а также в разработке новой методологии и спиновой технологии.

[2] Статья размещена на сайте Информационного агенства “Татар-информ” (http://www.tatar-inform.ru/news/2017/09/25/574304/). 25 сентября 2017. Автор статьи: Надежда Гордеева, фото: Рамиль Гали. Печатается с сокращениями

Новичок с хорошим потенциалом[3]

Федеральный исследовательский центр (ФИЦ) на базе Казанского научного центра Российской академии наук (КазНЦ РАН) начал свою работу в столице Татарстана. Об этом было официально объявлено в среду на заседании Совета при Президенте РТ по образованию и науке.

Разговоры о том, что юридически самостоятельные институты в составе КазНЦ РАН вскоре исчезнут и вместо них появится некая единая структура, в научных кругах велись давно. Собственно, уже когда в 2013 году началась глобальная реформа в РАН и было образовано Федеральное агентство научных организаций (ФАНО), стало ясно, что в региональных подразделениях академии без перемен тоже не обойдется.

Перемены эти (как вспомнил, открывая заседание совета, Президент Татарстана Рустам Минниханов) вызвали большую полемику в научных кругах республики. Глава республики выразил признательность учёным за то, что они “в конечном итоге оказали поддержку” идее создания ФИЦ.

И хотя совершенно понятно, что эта поддержка, мягко говоря, нелегко далась представителям академической науки, факт налицо: в Казани отныне действует новая научная структура.

Как рассказал на заседании совета председатель КазНЦ РАН (по всей видимости, он же будет руководить и ФИЦ) Олег Синяшин, в состав Федерального исследовательского центра в итоге вошли семь научных подразделений – казанские институты органической и физической химии им. Арбузова, биохимии и биофизики, механики и машиностроения, физико-технический институт им. Завойского, поликлиника КазНЦ РАН, а также НИИ сельского хозяйства и НИИ агрохимии и почвоведения, которые не входили в состав КазНЦ, а были подразделениями Россельхозакадемии (которая сама была реорганизована в 2013 году и вошла в состав РАН).

Вновь образованный исследовательский центр, по словам Олега Синяшина, имеет мощный потенциал. Действительно, практически все вошедшие в его состав институты обладали серьёзным авторитетом в научном мире, у каждого было немало наработок, причём не только фундаментального, но и прикладного характера. В общем, у ФИЦ есть все предпосылки для того, чтобы достойно выполнить свою миссию – поддержать международный авторитет российской науки, обеспечить модернизацию

и конкурентность нашей экономики, связь науки с образованием и производством.

Кооперация науки и реального сектора экономики прежде всего предполагается в здравоохранении и сельском хозяйстве. Речь идёт, в частности, о создании новых лекарств, средств защиты растений и животных, селекции новых сортов, разработке новых технологий хранения и переработки растительного и пищевого сырья.

Вообще, большинство новых проектов исследовательского центра будут носить междисциплинарный характер, благо разность профилей объединяемых научных учреждений этому способствует. В структуре ФИЦ планируется работа инжинирингового центра, где будут заниматься коммерциализацией разработок. В этом вопросе ФИЦ рассчитывает на поддержку ведущих республиканских предприятий, которые станут его индустриальными партнерами, а также на совместную работу с ведущими вузами Казани. Кроме того, планируется открыть собственную магистратуру по специальностям, которые отсутствуют в вузовской системе республики.

Конечно, без серьёзных финансовых вложений развитие нового исследовательского центра немыслимо. Олег Синяшин озвучил цифру: только для реализации инфраструктурных проектов необходимо на четыре года 420 млн. рублей. Правда, тут же подчеркнул: центр ориентируется на многоканальное финансирование, то есть не только на бюджетные деньги, но и на различные гранты и внебюджетные источники, причём со временем их должно быть больше, чем бюджетных.

---

[3] Газета “Республика Татарстан”, № 169 (28357). 16 ноября 2017. Автор статьи: Евгения Чеснокова. Фото: пресс-служба Президента. http://rt-online.ru/novichok-s-horoshim-potentsialom/.

Впрочем, как раз по финансированию, отметил участвовавший в заседании совета президент РАН Александр Сергеев, вопросов быть не должно – под создание подобных центров финансирование для ФАНО должны увеличить. Другой вопрос, подчеркнул Александр Сергеев, что не всегда объединение успешных по отдельности научных структур оправдывает себя. К тому же объединяются институты разных профилей, это создает дополнительные сложности. И если вести речь о прикладных проектах, то они, по мнению президента РАН, будут успешными, только если в конце цепочки стоит квалифицированный заказчик, в роли которого может выступать не только какая-то компания, но и сам регион.

– Мощь вашей республики в целом и наличие здесь очень мощных высокотехнологичных компаний, мне кажется, открывают перед вами существенные возможности. Желаю вам эффективно их использовать, – обратился Александр Сергеев к Олегу Синяшину.

В свою очередь руководитель ФАНО Михаил Котюков также отметил, что огромный потенциал, накопленный багаж знаний и поддержка руководителя региона – хорошие составляющие для успешной работы новой структуры. И пообещал, что фундаментальные разработки центра ФАНО готово поддерживать материально. Но не стоит при этом забывать о сотрудничестве с образованием и промышленностью – без этого успех невозможен.

– Всё будет зависеть от нас, – подвёл итог разговору Рустам Минниханов. – Мы должны вовлечь в процесс крупные предприятия, всё научное сообщество. Смычка с ведущими вузами тоже очень важна. Нужно вовлекать и другие центры РАН в те проекты, которые реализуются в Татарстане.

Олег Синяшин также сообщил, что будет действовать попечительский совет нового центра, и возглавить его согласился Президент Татарстана.

цифры и факты

2017 год в цифрах

Кадры (на 31 декабря 2017 г.)

Уволены

1. Чумаров П.И., инженер-исследователь
2. Зиатдинова Г.Н., бухгалтер
3. Хамидуллин Р.Р., водитель
4. Николенко Е.Н., уборщик служебных помещений
5. Лексин П.В., н.с.
6. Кравченко А.И., слесарь-сантехник
7. Багаутдинова Л.Ф., уборщик служебных помещений
8. Валиуллов Р.В., м.н.с.
9. Житейцев Е.Р., н.с.
10. Ханипов Т.Ф., м.н.с.
11. Аджалиев Ю.А., зам. директора по общ. вопросам
12. Аджалиева З.Т., руководитель ГЭЗ(гл.энеогетик)
13. Ситдыков И.Р., аспирант, м.н.с.
14. Андреева Р.В., бухгалтер
15. Корышкин И.М., инженер-исследователь
16. Абдрахманова С.А., инженер-исследователь
17. Погорельская С.В., агент
18. Хузеева Л.Г., инженер-исследователедь

Приняты

1. Перминов Н.С., м.н.с.
2. Корышкин И.М., инженер-исследователь
3. Лакеева Е.Н., маляр
4. Савканаева Т.В., уборщик служебных помещений
5. Ханипов Т.Ф., м.н.с.
6. Шигапов И.Б., слесарь-сантехник
7. Оладошкин Ю.В., зам. директора по общ.вопросам
8. Загидуллин Р.Р., м.н.с.
9. Хлебников И.С., руководитель ГЭЗ (главный энергетик)

Численность сотрудников

- Общая численность – 212 (из них 28 совместителя)
- Научных сотрудников – 123 (из них 13 совместителей)
- Действительных членов РАН – 1
- Член-корреспондентов АН РТ – 2
- Докторов наук – 28 (из них 4 совместителя)
- Кандидатов наук – 70 (из них 8 совместителей)

Средний возраст (лет)

- Докторов наук – 66
- Кандидатов наук – 48
- Научных сотрудников без степени – 41.5

Финансирование (в тыс. руб.)

Общий объём – 131379.4

- Федеральный бюджет – 84494.0, в т.ч.:
  - выполнение гос. задания – 76177.0
  - Программы фундаментальных исследований (Президиума, ОФН и ОНИТ РАН) – 6466.7
  - услуги по аспирантуре – 721.60
  - организация и проведение XI Международного симпозиума по фотонному ЭХО – 100.0
  - выплата стипендий аспирантам – 1029.3
- Российский научный фонд – 24000.0
- Российский фонд фундаментальных исследований – 3471.0, в т.ч.:
  - компенсация расходов организации, необходимых для выполнения проектов РФФИ – 2351.8
  - грант на реализацию научного проекта – 720.0
  - организация всероссийских и международных научных мероприятий (2 конференции) – 400.0
- Академия наук РТ – 2370.0
- Договора НИР, контракты – 14000.0
- Договора – работы, услуги (с НДС) – 157.60
- Прочие поступления – 2886.8

Публикации

- Монографии – 2
- Сборники – 7
- Главы в книгах – 2
- Статьи: всего – 180, из них:
  - в зарубежных журналах – 102
  - в отечественных журналах – 31
  - в других изданиях – 47
- Тезисы: всего – 274, из них:
  - в материалах международных конференций – 227
  - в материалах отечественных конференций – 47

Темы государственного задания на 2017 год

1. Разработка физических основ и элементной базы квантовых оптических и спиновых технологий.
2. Исследование спин-зависимых молекулярных процессов, молекулярного магнетизма, когерентного контроля динамики электронных спинов, структуры и молекулярной динамики нерегулярных, в том числе биологических, систем методами электронного парамагнитного резонанса. Развитие методологии магнитного резонанса.
3. Синтез и исследование новых материалов и структур с заданными функциональными свойствами.
4. Нанофизика перспективных материалов и гибридных мезоскопических структур.
5. Синтез и модификация нанокомпозитов, субмикронных слоёв и микроструктур с использованием ионных и световых пучков.
6. Развитие новых методов когерентной оптической и гамма-спектроскопии и фемтосекундного лазерного контроля квантовой динамики в нанообъектах, примесных кристаллах, полупроводниках и жидкостях.

Проекты, финансируемые на конкурсной основе

Программы фундаментальных исследований Президиума РАН

1. *Актуальные проблемы физики низких температур*

– Квантовая информатика на основе оптических переходных и коллективных процессов при низких температурах. Самарцев В.В., д.ф.-м.н.

– Особенности энергетического спектра в псевдощелевой фазе сверхпроводящих соединений. Тейтельбаум Г.Б., д.ф.-м.н.

2. *Наноструктуры: физика, химия, биология, основы технологий*

– Изучение особенностей функционирования спинового клапана для сверхпроводящего тока на основе эффекта близости сверхпроводник/ферромагнетик Гарифуллин И.А., д.ф.-м.н.

3. *Электронный спиновый резонанс, спин-зависящие электронные эффекты и спиновые технологии*

– Развитие теории и экспериментальное исследование спинового обмена между парамагнитными частицами в растворах. Салихов К.М., ак., д.ф.-м.н.

– Поиск систем и реализация квантовых логических операций с использованием электронных спинов в качестве кубитов. Салихов К.М., ак., д.ф.-м.н.

– Исследование структуры, магнитных и оптических свойств парамагнитных центров, образованных примесными ионами переходных групп в диэлектрических кристаллах. Тарасов В.Ф., д.ф.-м.н.

– Термо- и фотопереключение спиновых состояний ($S = 1/2 \leftrightarrow S = 5/2$) молекулярных спин-переменных соединений Fe(III) из основных в стабильные основные, квазистационарные и динамически неравновесные состояния с изменённым спином. Овчинников И.В., д.ф.-м.н.

– Неравновесная суперполяризация электронных спинов, индуцированная в ходе спин-зависящих молекулярных процессов. Суханов А.А., к.ф.-м.н.

– Контроль ферромагнетизма в оксидных полупроводниках, легированных 3d-элементами, путём электромиграции или инжекции кислородных вакансий. Хайбуллин Р.И., к.ф.-м.н.

– Разработка методики ЭПР-исследований неоднородных свойств материалов с сильными электронными корреляциями (сверхпроводников, топологических изоляторов и квантовых магнетиков). Таланов Ю.И., д.ф.-м.н.
– Исследования структурных, магнитных и электрических особенностей в низкоразмерных мультиферроиках. Ерёмина Р.М., д.ф.-м.н.
– Поиск и исследование новых молекулярных магнитов. Воронкова В.К., д.ф.-м.н.
– Развитие методологии определения архитектуры расположения спиновых меток в группах с помощью импульсных методов ЭПР. Зарипов Р.Б., к.ф.-м.н.
– Применение метода ЭПР-спектроскопии для исследования баланса оксида азота и супероксиддисмутаз в механизмах восстановления функций организма после экспериментальной гипокинезии. Гайнутдинов Х.Л., д.б.н.
– Разработка методики применения ЭПР-спектроскопии для контроля обмена железа в организме профессиональных спортсменов. Петухов В.Ю., д.ф.-м.н.
– Характеристики сигналов ЭМР в биологических системах и их информативность для медико-биологических исследований и медицинской диагностики. Юртаева С.В., к.-ф.-м.н.

Программы фундаментальных исследований Отделения физических наук РАН

1. *Физика новых материалов и структур*
– Создание и исследование новых материалов для оптоэлектроники и информатики. Салихов К.М., д.ф.-м.н.
– Синтез перспективных нанокомпозитных материалов на основе кремния, широкозонных полупроводников, углеродных нанотрубных слоёв и металлических наночастиц и исследование их физико-химических свойств. Сулейманов Н.М., д.ф.-м.н.; Файзрахманов И.А.
2. *Спиновые явления в твёрдотельных наноструктурах и спинтроника*
– Развитие научных основ управления оптическими, спиновыми и магнитными свойствами соединений на основе светопоглощающих и излучающих систем. Воронкова В.К., д.ф.-м.н.; Лобков В.С., к.ф.-м.н.
3. *Электронные корреляции в системах с сильным взаимодействием*
– Изучение особенностей электронных состояний в псевдощелевой фазе купратных соединений. Тейтельбаум Г.Б., д.ф.-м.н.
4. *Фундаментальная оптическая спектроскопия и её приложения*
– Когерентная оптическая спектроскопия примесных кристаллов, аморфных сред, полупроводников и гетероструктур. Самарцев В.В., д.ф.-м.н.

Программа фундаментальных исследований Отделения нанотехнологий и информационных технологий РАН

Элементная база квантовых компьютеров
– Синтез и исследование магнитных наноразмерных систем наноэлектроники, квантовой информатики и оптоэлектроники. Салихов К.М., д.ф.-м.н.
– Квантовый процессор на нановолоконных кольцевых резонаторах, связанных через управляемую квантовую точку. Моисеев А.С., д.ф.-м.н.

Конкурсы Российского научного фонда (РНФ)

“Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований отдельными научными группами”

1. Калачёв А.А., д.ф.-м.н.: Разработка базовых устройств дальнодействующей оптической квантовой связи (№ 14-12-00806)
2. Степанов А.Л., д.ф.-м.н.: Формирование слоёв пористого кремния и германия с металлическими наночастицами методом ионной имплантации (№ 17-12-01176)

“Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований по приоритетным тематическим направлениям исследований”

1. Гольцман Г.Н., д.ф.-м.н.: Интегральные однофотонные источники света с мультиплексированием (№ 16-12-00045)
2. Тарасов В.Ф., д.ф.-м.н.: Изотопически чистые примесные кристаллы для квантовой памяти (№ 16-12-00041)

Конкурсы Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ)

1. Бухараев А.А., д.ф.-м.н.: Изучение влияния упругих напряжений на термоассистируемый процесс перемагничивания ферромагнитных частиц (№ 15-02-02728)
2. Воронкова В.К., д.ф.-м.н.: Синтез и исследование фотофизических свойств функционально замещённых металлопорфиринов (MeP, Me = Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn) и полипорфириновых соединений на их основе (№ 16-03-00586)
3. Галяметдинов Ю.Г.: Создание высокоорганизованных люминесцентных сред на основе парамагнитных квантовых точек и ионов лантаноидов (№ 17-03-00258)
4. Гарифуллин И.А. Эффект спинового клапана для сверхпроводящего тока в тонкопленочной слоистой системе сверхпроводник/полуметалл (№ 17-02-00229)

5. Ерёмина Р.М.: Модели магнитной структуры низкоразмерных магнетиков на примере слабо взаимодействующих спиновых цепочек и зигзагообразных стенок (№ 17-02-00953)
6. Калачёв А.А., д.ф.-м.н.: Оптическая квантовая память и однофотонные источники на основе многоатомных систем и нановолокон (№ 15-02-05478)
7. Лобков В.С., к.ф.-м.н.: Новые гибридные оптические наноматериалы с высокой фотостабильностью и с управляемыми люминесцентными свойствами (№ 15-03-02544)
8. Мамин Р.Ф.: Модификация плёнок титаната бария-стронция на кремниевых подложках и исследование их поляризационных и фотопроводящих свойств (№ 17-02-20258)
9. Нургазизов Н.И.: Использование магнитоупругого эффекта для детектирования механических напряжений с высоким пространственным разрешением (№ 17-08-00915)
10. Самарцев В.В.: Когерентная двух- и трёхквантовая фемтосекундная спектроскопия наноструктур и квантовых точек, а также модуляционная оптическая эхо-спектроскопия примесных кристаллов (№ 17-02-00701)
11. Степанов А.Л.: Создание элементов интегральной дифракционной оптики на основе полупроводниковых халькогенидных стекол (№ 17-08-00850)
12. Шкаликов А.В., к.ф.-м.н.: Генерация однофотонных состояний с орбитальным угловым моментом в процессе спонтанного параметрического рассеяния в резонаторе (№ 16-02-01055)

Ориентированный проект

Степанов А.Л., д.ф.-м.н.: Тонкоплёночные солнечные элементы на основе пористых полупроводниковых 2D-слоёв с металлическими наночастицами (№ 16-29-06137)

РФФИ и Белорусский республиканский фонд фундаментальных исследований

1. Модифицирование зонной структуры тонкоплёночного германия и исследование его оптических и электрофизических свойств (грант РФФИ № 16-52-00021 Бел_а). Руководитель с российской стороны: Баязитов Р.М., д.ф.-м.н.
2. Повышение эффективности функционирования нейронных сетей головного мозга путём контроля уровня монооксида азота после травмы мозга и/или нарушения церебрального кровотока (грант РФФИ № 16-54-00098 Бел-а). Руководитель с российской стороны: Гайнутдинов Х.Л., д.б.н.

Гранты РФ “Мой первый грант”

1. Гаврилова Т.П., к.ф.-м.н.: Создание и исследование наногранулированных композитных материалов на основе $CaCu_3Ti_4O_{12}$ и гексаферрита стронция или лантан-стронциевых манганитов с необычными магнитоэлектрическими свойствами (№ 16-32-00660)
2. Леонтьев А.В.: Исследование динамики возбуждённых состояний ионов Ce^{3+} в кристаллах $LiY_xLu_{(1-x)}F_4$ (x = 0.1) для создания твёрдотельного генератора ультракоротких импульсов УФ диапазона спектра (№ 16-32-00406)
3. Шмелёв А.Г., к.ф.-м.н.: Создание и исследование новых композитных материалов на основе нанокристаллитов халькогенидов кадмия для оптоэлектроники и фотоники (№ 16-32-00397)

Региональные гранты РФФИ

1. Моисеев С.А., д.ф.-м.н.: Разработка квантовой памяти микроволнового диапазона длин волн на электронно-ядерных спиновых ансамблях (№ 15-42-02462_Поволжье)
2. Салихов К.М., д.ф.-м.н.: Исследование молекулярного механизма стабилизирующего и криопротекторного влияния трегалозы на функциональные свойства белков и белковых комплексов фотосинтетических реакционных центров (№ 15-43-02538_Поволжье)
3. Степанов А.Л., д.ф.-м.н.: Создание при помощи ионной имплантации и исследование фракционных решёток на новых типах полимерных и композиционных наноматериалов для нужд специального машиностроения (№ 15-48-02525_Поволжье)
4. Тарасов В.Ф., д.ф.-м.н.: Димеры редкоземельных ионов для квантовой информатики (№ 15-42-02324_Поволжье)
5. Тейтельбаум Г.Б., д.ф.-м.н.: Разработка физических основ новых элементов спинтроники на базе топологических изоляторов (№ 15-42-02477_Поволжье)

Договора

1. “Разработка модуля сканирования диэлектрических свойств пластового флюида скважинной лаборатории для определения свойств пласта и пластового флюида” (рук. Фаттахов Я.В.). Договор с ФГАОУ ВПО КФУ.
2. “Разработка гидродинамических маркеров для мониторинга разработки месторождений СВН” (рук. Галяутдинов М.Ф.). Договор с ФГАОУ ВПО КФУ.

3. “Разработка подходов к организации квантовых каналов между компонентами распределённого ЦОД по открытому пространству” (рук. Латыпов И.З.). Договор с ФГАОУ “Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики” (Университет ИТМО).
4. “Разработка адаптивного блока расширения центральной земляной станции спутниковой связи” (рук. Латыпов И.З.). Договор с ФГАОУ ВО МФТИ.

Публикации сотрудников института

Монографии

1. Самарцев В.В., Никифоров В.Г.: Фемтосекундная лазерная спектроскопия. М.: Тровант 2017, 402 с.
2. Novel Magnetic Nanostructures: Unique Properties and Applications (E. Rentschler, N. Domracheva, M. Caporali, eds.). Elsevier, in press.

Главы в монографиях

1. Stepanov A.L., Vorobev V.V., Nuzhdin V.I., Valeev V.F., Osin Y.N.: Chapter 4 “Fabrication of porous silicon with silver nanoparticles by ion implantation” in book: Silver Nanoparticles. Advances in Research and Applications (Edwards B., ed.), p. 73–88. Nova Sci. Publ., 2017.
2. Stepanov A.L., Vorobev V.V., Nuzhdin V.I., Valeev V.F., Rogov A.M., Osin Y.N.: Chapter 8 “Synthesis of porous silicon and germanium layers with silver nanoparticles by ion implantation” in book: Advances in Nanotechnology (Bartul Z., Trenor J., eds.), p. 183–200. Nova Sci. Publ., 2017.

Сборники

1. Abstracts of the International Conference “Modern Development of Magnetic Resonance” (Salikhov K.M., ed.), Kazan, September 25–29, 2017. Казань: Изд-во КФТИ КазНЦ РАН 2017. 232 с.
2. Итоговая конференция молодых учёных Казанского физико-технического института КазНЦ РАН, 13 апреля 2017 года. Сб. материалов конф. Казань: Изд-во Казан. ун-та 2017. 32 с.
3. Казанский физико-технический институт имени Е. К. Завойского 2016. Ежегодник (Салихов К.М., ред.). Казань: Изд-во КФТИ КазНЦ РАН 2017. 264 с.
4. Конференция молодых учёных “Молодёжь и инновации Татарстана”, КФТИ КазНЦ РАН, 26–27 октября 2017 года. Сб. материалов конф. Казань: Изд-во Казан. ун-та 2017. 60 с.
5. Материалы XII Международной научной школы “Наука и инновации-2017” (Попов И.И., Козлов В.А., Самарцев В.В., ред.), пансионат “Яльчик”, Марий-Эл, Россия, 10–16 июля 2017 года. Йошкар-Ола: Изд-во ПГТУ 2017. 278 с.
6. Сборник трудов “XXI Всероссийской конференции по физике сегнетоэлектриков (ВКС-XXI)”, Казань, Россия, 25–30 июня, 2017 года. Казань: Изд-во Казанского университета 2017. 276 с.
7. Book of Abstracts International Workshop on Phase Transitions and Inhomogeneous States in Oxides, Kazan, Russia June 25–30, 2017. Kazan: Publishing House of the Kazan University 2017. 53 p.

Статьи*

1. Akatiev D., Latypov I., Shkalikov A., Kalachev A.: Preparation of single-photon states via cavity assisted spontaneous parametric down conversion for quantum memory based on $Y_7LiF_4:Nd^{3+}$ crystal. EPJ Web of Conf. **161**, 02026 (2017)
2. Akhmetov I.D., Kashapov R.N., Kashapov L.N., Gumarov G.G., Konov A.B.: Development of the technology of manufacturing a ceramic tip of a resectoscope. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. **240**, no. 1, 012004 (2017)
3. Akhmetov M.M., Konygin G.N., Rybin D.S.: NMR study conformations of calcium gluconate in the aqueous solution. Appl. Magn. Reson. **48**, iss. 10, 971 (2017)
4. Averkiev N.S., Bersuker I.B., Gudkov V.V., Zhevstovskikh I.V., Sarychev M.N., Zherlitsyn S., Yasin S., Shakurov G.S., Ulanov V.A., Surikov V.T.: Acoustic properties of crystals with jahn-teller impurities: elastic moduli and relaxation time application to $SrF_2:Cr^{2+}$. J. Phys. Soc. Japan **86**, 114604 (2017)
5. Averkiev N.S., Bersuker I.B., Gudkov V.V., Zhevstovskikh I.V., Sarychev M.N., Zherllitsyn S., Yasin S., Shakurov

* Статьи, опубликованные в сборнике Ежегодник 2017, не приводятся.

G.S., Ulanov V.A., Surikov V.T.: Manifestation of the Jahn-Teller effect in elastic moduli of strontium fluorite crystals doped with chromium ions. J. Phys.: Conf. Ser. **833**, no. 1, 012003 (2017)
6. Ay F., Rameev B.Z., Basaran A.C., Kupriyanova G.S., Goikhman A.Yu., Aktaş B.: Magnetic properties of Fe/Ni and Fe/Co multilayer thin films. Appl. Magn. Reson. **48**, iss. 1, 85–99.
7. Bales B.L., Bakirov M.M., Galeev R.T., Kirilyuk I.A., Kokorin A.I., Salikhov K.M.: The current state of measuring bimolecular spin exchange rates by the EPR spectral 9. Manifestations of the exchange and dipole-dipole interactions in dilute solutions of nitroxide free radicals with proton hyperfine structure. Appl. Magn. Reson. **48**, iss. 11-12, 1399–1445 (2017)
8. Baniodeh A., Mondal A., Galeev R., Sukhanov A., Eremina R., Voronkova V., Powell A.K.: How far can the anisotropy deviate from uniaxiality in a Dy-based single-molecule magnet? Dinuclear Dy (III) complex study. Appl. Magn. Reson. **48**, iss. 1, 101–113 (2017)
9. Batalov R.I., Nuzhdin V.I., Valeev V.F., Vorobev V.V., Osin Y.N., Ivlev G.D., Stepanov A.L.: Pulsed laser annealing of high-dose Ag^+-ion implantation Si layer. Web of Science **51**, 015109 (5 стр.) (2018)
10. Batalov R.I., Nuzhdin V.I., Valeev V.F., Vorobev V.V., Osin Yu.N., Ivlev G.D., Stepanov A.L.: Pulsed laser annealing of high-dose Ag^+-ion implanted Si layer. J. Phys. D: Appl. Phys. (2017) (in press)
11. Bazarov V.V., Nuzhdin V.I., Valeev V.F., Stepanov A.L.: Characterization of silicon surfaces implanted with silver ions at low energy using spectroscopic ellipsometry. Vacuum **148**, 254–257 (2017)
12. Bizyaev D.A., Bukharaev A.A., Nurgazizov N.I., Khanipov T.F.: Investigation of the domain structure transformation under mechanical deformations in permalloy microparticles. J. Phys.: Conf. Ser. **859**, 012005 (2017)
13. Chuprina I., Ilnur Latypov I.: Generation of broadband single-photon states in photonic-crystal fibers with flattened dispersion profiles. EPJ Web of Conf. **161**, 01008 (2017)
14. Deryagin O.G., Gavrilova S.A., Gainutdinov K.L., Andrianov V.V., Yafarova G.G., Buravkov A.V., Koshelev V.B.: Ischemic preconditioning in rats: effects of nitric oxide and activation and inhibition of K^+-ATP-channels. Eur. J. Clin. Invest. **47**, Suppl. 1, 55 (2017)
15. Deryagin O.G., Gavrilova S.A., Gainutdinov Kh.L., Golubeva A.V., Andrianov V.V., Yafarova G.G., Buravkov S.V., Koshelev V.B.: Molecular bases of brain preconditioning. Front. in Neuroscence **11**, art. 427, 1–12 (2017)
16. Domracheva N.E., Vorobeva V.E., Gruzdev M.S., Shvachko Y.N., Starichenko D.V.: EPR detection of presumable quantum behavior of iron oxide nanoparticles in dendrimeric nanocomposite. Inorg. Chim. Acta **465**, 38–43 (2017)
17. Domracheva N.E., Vorobeva V.E., Ovcharenko V.I., Bogomyakov A.S., Zueva E.M., Gruzdev M.S., Chervonova U.V., Kolker A.M.: Counterion effect on the spin-transition properties of the second generation iron(III) dendrimeric complexes. Inorg. Chim. Acta **459**, 131–142 (2017)
18. Eremina R., Gavrilova T., Yatsyk I., Fazlizhanov I., Likerov R., Shustov V., Zavartsev Yu., Zagumennyi A., Kutovoi S.: Investigations of Y_2SiO_5: Nd^{143} by ESR method. J. Magn. Magn. Mater. **440**, 13–14 (2017)
19. Eremina R., Seidov Z., Ibrahimov I., Najafzade M., Aljanov M., Mamedov D., Gavrilova T., Gilmutdinov I., Chichkov V., Andreev N.: Magnetization of manganite thin films on ferroelectric substrates. J. Magn. Magn. Mater. **440**, 179–180 (2017)
20. Esmaeili A., Vakhitov I.R., Yanilkin I.V., Gumarov A.I., Khaliulin B.M., Gabbasov B.F., Aliyev M.N., Yusupov R.V., Tagirov L.R.: FMR studies of ultra-thine pitaxial $Pd_{0.92}Fe_{0.08}$ film. Appl. Magn. Reson., published online September 15, 2017
21. Falin M.L., Latypov V.A., Leushin A.M., Safiullin G.M.: EPR and optical spectroscopy of Yb^3 ions in hexagonal perovskite $RbMgF_3$ crystals. J. Alloys Compd. (2017) (in press)
22. Fomin D., Dubov V., Galkin K., Galkin N., Batalov R., Shustov V.: Formation and properties of crystalline $BaSi_2$ thin films obtained by solid phase epitaxy on Si(111). Jap. J. Appl. Phys. Conf. Proc. **5**, 011203 (1–5) (2017)
23. Gaisin R.R., Sharifullina K.V., Kashapov R.N.: A shader for simultaneous ambient occlusion and edge detection for reverse engineering. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. **240**, no. 1, 012016 (2017)
24. Garifullin I.A.: Superconducting spin-valve and triplet superconductivity. JETP Lett. **106**, no. 1, 57–67 (2017)
25. Gavrilova T.P., Deeva J.A., Yatsyk I.V., Yagfarova A.R., Gilmutdinov I.F., Lyadov N.M., Milovich F.I., Chupakhina T.I., Eremina R.M.: Structural and magnetic properties of nanostructured composites $(SrFe_{12}O_{19})_x(CaCu_3Ti_4O_{12})_{1-x}$. Physica B: Physics of Condens. Matter (2017)
26. Gavrilova T.P., Eremina R.M., Yatsyk I.V., Gilmutdinov I.F., Kiiamov A.G., Lyadov N.M., Kabirov Yu.V.: Magnetic properties of $(La_{0.7}Sr_{0.3}MnO_3)_x(CaCu_3Ti_4O_{12})_{1-x}$ nanostructured composites. J. Alloys Compd. **714**, 213–224 (2017)
27. Gavrilova T.P., Yatsyk I.V., Gilmutdinov I.F., Eremina R.M.: Magnetic and dielectric properties of o-$LuFeO_3$/$SrTiO_3$. J. Phys.: Conf. Ser. **903**, 012014 (1–5) (2017)
28. Gerasimov K.I., Moiseev S.A., Zaripov R.B.: Microwave spin frequency comb memory protocol controlled by gradient magnetic pulses. Appl. Magn. Reson. **48**, iss. 8, 795–804 (2017)
29. Gimazov I., Talanov Yu., Sakhin V., Adachi T., Noji T., Koike Y.: Superconducting fluctuations above the critical temperature in $Bi_2Sr_2Ca_{1-x}Y_xCu_2O_{8+\delta}$ as revealed by microwave absorption. Appl. Magn. Reson. **48**, iss. 1, 1–10 (2017)
30. Gor'kov L., Teitel'baum G.: On the origin of a small hole pocket in the Fermi surface of underdoped $YBa_2Cu_3O_y$. J. Supercond. Nov. Magn., published online September 30, 2017

31. Grafe H.-J., Nishimoto S., Iakovleva M., Vavilova E., Spillecke L., Alfonsov A., Sturza M.-I., Wurmehl S., Nojiri H., Rosner H., Richter J., Roessler U.K., Drechsler S.-L., Kataev V., Büchner B.: Signatures of a magnetic fieldinduced unconventional nematic liquid in the frustrated and anisotropic spin-chain cuprate $LiCuSbO_4$. Sci. Rep. **7**, 6720 (1–16) (2017)
32. Iakovleva M., Zimmermann S., Zeisner J., Alfonsov A., Grafe H.-J., Valldor M., Vavilova E., Büchner B., Kataev V.: Magnetic resonance spectroscopy on the spin-frustrated magnets $YBaCo_3MO_7$ (M = Al, Fe). Phys. Rev. B **96**, no. 6, 64417 (1–11) (2017)
33. Ivanova T.A., Turanova O.A., Ovchinnikov I.V., Mingalieva L.V., Gil'mutdinov I.F., Shustov V.A., Gafiyatullin L.G.: Intermolecular interactions and spin states of complexes $[Fe(3\text{-}MeO\text{-}Qsal)_2]Y$ (Y = PF_6, BF_4). Russ. J. Org. Chem. **62**, no. 4, 476–482 (2017)
34. Kaleev A.A., Kashapov L.N., Kashapov N.F., Kashapov R.N.: Application of reverse engineering in the medical industry. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. **240**, no. 1, 012030 (2017)
35. Kamashev A.A., Leksin P.V., Garif'yanov N.N., Validov A.A., Schumann J., Kataev V., Büchner B., Garifullin I.A.: Superconducting spin-valve effect in a heterostructure containing the Heusler alloy as a ferromagnetic layer. J. Mag. Mag. Mat. (2017) (in press)
36. Kamashev A.A., Leksin P.V., Schumann J., Kataev V., Thomas J., Gemming T., Büchner B., Garifullin I.A.: Proximity effect between a superconductor and a partially spin-polarized ferromagnet: Case study of the Pb/Cu/$Co_2Cr_{1-x}Fe_xAl$ trilayer. Phys. Rev. B **96**, 024512 (2017)
37. Kashapov R.N., Kashapov L.N., Kashapov N.F.: Production of metallic powders in a plasma-electrolytic discharge. J. Phys.: Conf. Ser. **927**, 012086 (2017)
38. Kashapov R.N., Kashapov L.N., Kashapov N.F.: Analysis and development of methods for obtaining metallic powders for selective laser melting. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. **240**, no. 1, 012071 (2017)
39. Kashapov R.N., Kashapov L.N., Kashapov N.F.: Formation of cracks in the selective laser melting of objects from powdered stainless steel 17-4 PH. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. **240**, no. 1, 012074 (2017)
40. Kashapov R.N., Kashapov L.N., Kashapov N.F.: Investigations of the growth of the steam-air shell of a gas discharge with a liquid electrolytic cathode of sodium hydroxide solution. J. Phys.: Conf. Ser. **927**, 012085 (2017)
41. Kashapova R.M., Kashapov R.N., Kashapova R.S.: Mesh three-dimensional arm orthosis with built-in ultrasound physiotherapy system. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. **240**, no. 1, 012036 (2017)
42. Kavetskyy T., Iida K., Nagashima Y., Kuczumow A., Sausa O., Nuzhdin V., Valeev V., Stepanov A.L.: High-dose boron and silver ion implantation into PMMA probed by slow positrons: Effects of carbonization and formation of metal nanoparticles. J. Phys.: Conf. Ser. **791**, 12028 (1–4) (2017)
43. Kavetskyy T., Smutok O., Gonchar M., Demkiv O., Klepach H., Kukhazh Y., Sausa O., Petkova T., Boev V., Ilcheva V., Petkov P., Stepanov A.L.: Laccase-containing ureasil-polymer composites as the sensing layer of amperometric biosensor. J. Appl. Polym. Sci. **134**, 45278 (1–7) (2017)
44. Kavetskyy T.S., Stepanov A.L.: Comments on the "Metallic nanoparticles (Cu, Ag, Au) in chalcogenide and oxide glassy matrices". Semic. Phys., Quantum Electr. Optoelectr. **20**, no. 4, 481–482 (2017)
45. Kiiamov A.G., Lysogorskiy Y.V., Vagizov F.G., Tagirov L.R., Tayurskii D.A., Croitori D., Tsurkan V., Loidl A.: Mössbauer spectroscopy evidence of intrinsic non-stoichiometry in iron telluride single crystals. Annalen der Physik (Berlin) **529**, no. 4, 1600241 (9) (2017)
46. Kokorin A.I., Zaripov R.B., Gromov O.I., Hideg K., Kálai T.: Tailored nitroxide radicals and biradicals containing ^{13}C enriched acetylene groups: ENDOR and DFT investigation. Appl. Magn. Reson., published online September 07, 2017
47. Kovalchukova O.V., Ryabov M.A., Dorovatovskii P.V., Zubavichus Y.V., Utenyshev A.N., Kuznetsov D.N., Volyansky O.V., Voronkova V.K., Khrustalev V.N.: Synthesis and characterization of a series of novel metal complexesof N-heterocyclic azo-colorants derived from 4-azo-pyrazol-5-one. Polyhedron **121**, 41–52 (2017)
48. Krupskaya Y., Schaepers M., Wolter A.U.B., Grafe H.-J., Vavilova E., Moeller A., Büchner B., Kataev V.: Magnetic resonance study of the spin-1/2 quantum magnet $BaAg_2Cu[VO_4]_2$. Z. Phys. Chem. **231**, no. 4, 759–775 (2017)
49. Lapaev D.V., Nikiforov V.G., Safiullin G.M., Lobkov V.S., Knyazev A.A., Krupin A.S., Galyametdinov Y.G.: UV laser-induced enhancement of photoluminescence intensity in vitrified terbium(III) β-diketonate complex film in air. J. Lumin. (2017) (in press)
50. Lapaev D.V., Nikiforov V.G., Safiullin G.M., Lobkov V.S., Knyazev A.A., Galyametdinov Y.G.: Reusable temperature-sensitive luminescent material based on vitrified film of europium(III) β-diketonate complex. Opt. Mater. (2017) (in press)
51. Latypov I.Z., Shkalikov A.V., Akat'ev D.O., Kalachev A.A.: PPLN-based photon-pair source compatible with solidstate quantum memories and telecom optical fibers. IOP Conf. Series: J. Phys.: Conf. Ser. **859** (2017)
52. Lenk D., Morari R., Zdravkov V.I., Ullrich A., Khaydukov Yu., Obermeier G., Müller C., Sidorenko A.S., Krug von Nidda H.-A., Horn S., Tagirov L.R., Tidecks R.: Full switching FSF-type superconducting spin-triplet MRAM-element. Phys. Rev. B **96**, no. 18, 184521(18) (2017)
53. Lipps F., Arkenbout A.H., Polyakov A., Günther M., Salikhov T., Vavilova E., Klauss H.-H., Büchner B., Palstra T.M., Kataev V.: Magnetic properties of the spin-1 chain compound $NiC_{l3}C_6H_5CH_2CH_2NH_3$. Low Physics/Fiz. Nizk. Temp. **43**, no. 11, 1626–1633 (2017)
54. Mamin R.F., Bizyaev D.A., Yusupov R.V., Bukharaev A.A.: Phase separation and locally induced states in manganites. Ferroelectrics **509**, iss. 1, 50–56 (2017)

55. Mamin R.F., Bizyaev D.A., Yusupov R.V., Kabanov V.V., Bukharaev A.A.: Phase separation and locally induced states in manganites. Ferroelectrics **509**, 50–56 (2017)
56. Mamin R.F., Tayurskii D.A.: Phenomenological model of dielectric properties for PMN-PT. Ferroelectrics **509**, 27–31 (2017)
57. Migachev S.A., Mamin, R.F., Yusupov R.V.: Photoconductivity and photostimulated currency in PMN-PT. Ferroelectrics **509**, 14–18 (2017)
58. Mikhail B., Bublik V.T., Eremina R.M., Kulebyakin A., Lomonova E.E., Milovich F.O., Myzina V.A., Osiko V.V., Tabachkova N.Yu., Fazlizhanov I.I., Shustov V.A., Yatsyk I.V.: Effect of the valence state of Ce ions on the phase stability and mechanical properties of the crystals of ZrO_2-based solid solutions. Phys. Solid State **59** (10), 1934–1939 (2017)
59. Mingalieva L.V., Galeev R.T., Sukhanov A.A., Voronkova V.K., Budnikova I.K., Novitchi G.: Features of exchange interaction between Cr^{3+} ions in compounds $[Fe(phen)_3][Cr_2(OH)(Ac)(nta)_2]\cdot 6.25H_2O$ and $[Fe(bpy)_3][Cr_2(OH)(Ac)(nta)_2]\cdot 8H_2O$. Appl. Magn. Reson., published online September 11, 2017
60. Nikiforov V.G., Zharkov D.K., Shmelev A.G., Leontyev A.V., Lobkov V.S.: Selective detection of intermolecular response in benzonitrile through double-pulse excitation in optical Kerr effect spectroscopy. Appl. Phys. B: Lasers and Optics **123**, 1229 (2017)
61. Okay C., Vakhitov I.R., Valeev V.F., Khaibullin R.I., Rameev B.: Magnetic resonance study of Fe-implanted TiO_2 rutiles. Appl. Magn. Reson. **48**, iss. 4, 347–360 (2017)
62. Perminov N.S., Tarankova D.Yu., Moiseev S.A.: Superefficient long-lived multiresonator quantum memory. Proc. of SPIE (2017) (in press)
63. Podyachev S.N., Gimazetdinova G.Sh., Sudakova S.N., Shamsutdinova N.A., Lapaev D.V., Syakaev V.V., Gubaidullin A.T., Nagimov R.N., Mustafina A.R.: Influence of upper rim dibromo-substitution in bis-1,3-diketone calix[4]arenes on spectral properties of ligands and their lanthanide complexes. Tetrahedron **73**, 5397–5407 (2017)
64. Podyachev S.N., Sudakova S.N., Gimazetdinova G.Sh., Shamsutdinova N.A., Syakaev V.V., Barsukova T.A., Iki N., Lapaev D.V., Mustafina A.R.: Synthesis, metal binding and spectral properties on novel bis-1,3-diketone calyx[4]arenes. New J. Chem. **41**, 1526–1537 (2017)
65. Pugachev M.V., Bulatov T. M., Nguyen T.N., Pavelyev R.S., Gnezdilov O.I., Lodochnikova O.A., Islamov D.R., Kataeva O.N., Balakin K.V., Shtyrlin Y.G.: Wittig reactions of a bis-triphenylphosphonium pyridoxine derivative. Tetrahedron Lett. **58**, 766–769 (2017)
66. Sakhin V., Kukovitskii E., Garif'yanov N., Talanov Yu., Teitel'baum G.: Inhomogeneous state of the Bi_2Te_3 doped with manganese. J. Supercond. Nov. Magn. **30**, 63–67 (2017)
67. SakhinV., Kukovitskii E., Garifyanov N., Khasanov R., Talanov Yu., Teitel'baum G.: Local magnetic moments in the topological insulators. J. Magn. Magn. Mater. (2017) (in press)
68. Samartsev V., Mitrofanova T.: Correlated signals of cluster superfluorescence under two- and three-photon excitation of CdSe/CdS nanostructures. EPJ Web of Conf. **161**, 03011 (2017)69. Samartsev V.V., Mitrofanova T.G.: Correlated signals of the accumulated photon echo on CdSe-CdS quantum dots. J. Phys.: Conf. Ser. **858**, 012014 (2017)
70. Seidov Z., Gavrilova T.P., Svistov L.E., Bush A.A., Loidl A., Krug von Nidda H.-A.: Anisotropic exchange in $LiCu_2O_2$. Phys. Rev. B **95**, 224411 (2017)
71. Seidov Z., Krug von Nidda H.-A., Tsurkan V., Filippova I., Guenther A., Najafov A., Aliyev M.N., Vagizov F.G., Kiiamov A.G., Tagirov L.R., Gavrilova T., Loidl A.: Magnetic properties of chain antiferromagnets $RbFeSe_2$, $TlFeSe_2$, and $TlFeS_2$. Bull. Russ. Acad. Sci., Phys. **81**, no. 7, 885–887 (2017)
72. Shakhmuratov R.N., Vagizov F.G.: Application of the Mössbauer effect to study of subnanometer harmonic displacements in thin solids. Phys. Rev. B **95**, no. 24, 245429 (1–13) (2017)
73. Shakhmuratov R.N.: Transformation of the frequency-modulated continuous-wave field into a train of short pulses by resonant filters. Phys. Rev. A **96**, no. 11, 033805 (1–11) (2017)
74. Shukhin A., Kalachev A.: Spontaneous four-wave mixing in optical nanofibers at low temperatures. EPJ Web of Conf. **161**, 03016 (2017)
75. Stepanov A.L., Osin Y.N., Vorobev V.V., Valeev V.F., Nuzhdin V.I.: Optical reflectance of silicon implanted by silver ions. Optoelectr. Adv. Mater.: Rapid Comm. **11-12**, 685–690 (2017)
76. Stepanov A.L., Vorobev V.V., Nuzhdin V.I., Valeev V.F., Osin Y.N.: Characterisation of the surface of silver ion-implanted silicon by optical reflectance. J. Appl. Spectrosc. **84**, no. 5, 785–789 (2017); ЖПС **84**, № 51, 727–730 (2017))
77. Stepanov A.L.: Laser annealing of metal nanoparticles synthesized in glasses by ion implantation. Proc. SPIE 1022602 (1–8) (2017)
78. Sukhanov A.A., Kandrashkin Y.E., Voronkova V.K., Tyurin V.S.: Electron spin polarization of photo-excited copper coproporphyrin I: From monomers to dimers. Appl. Magn. Reson., published online November 13, 2017
79. Sukhanov A.A., Tarasov V.F., Eremina R.M., Yatsyk I.V., Likerov R.F., Shestakov A.V., Zavartsev Yu.D., Zagumennyi A.I., Kutovoi S.A.: ESR study of Y_2SiO_5:Nd^{143} isotopically pure impurity crystals for quantum memory. Appl. Magn. Reson. **48**, iss. 6, 589–596 (2017)
80. Sukhanov A.A., Tarasov V.F., Eremina R.M., Yatsyk I.V., Likerov R.F., Shestakov A.V., Kutovoi S.A.: ESR study of Y_2SiO_5:Nd^{143} isotopically pure impurity crystals for quantum memory. Appl. Magn. Reson. **48**, iss. 6, 589–596 (2017)

81. Suleimanov N.M., Khantimerov S.M., Kierzek K., Shustov V.A., Garipov R.R., Fatukhov R.R.: Structural and electrochemical properties of lithiated conical carbon nanotubes. Appl. Phys. A. (2017) (in press)
82. Talanov Yu., Sakhin V., Kukovitskii E., Garif'yanov N., Teitel'baum G.: Magnetic resonance study of the Bi_2Te_3 doped with manganese. Appl. Magn. Reson. **48**, iss. 2, 143–154 (2017)
83. Talipov A.A., Shmelev A.G., Shukhin A.A., Latypov I.Z.: Generation of pure single-photon states in commercial photonic-crystal fibers of telecommunication frequencies. Наносистемы: физика, химия, математика **8**, 347–350 (2017)
84. Teitel'baum G.B.: The phenomenological view at the two-component physics of cuprates. Письма в ЖЭТФ **106**, no. 3, 191–192 (2017); JETP Lett. **106**, no. 3, 199–208 (2017)
85. Trzcinski M., Kavetskyy T., Telbiz G., Stepanov A.L.: Optical characterisation of nanocomposite polymer formed by ion implantation of boron. J. Mater. Sci.: Mater. Electron. **28**, 7115–7120 (2017)
86. Turanov A., Khitrin A.K.: Proton exchange in gasoline-ethanol fuel blends. Fuel **189**, 440–442 (2017)
87. Turyikhanov D., Shkalikov A., Latypov I., Kalachev A.: Generation of single-photon states with orbital angular momentum in the process of spontaneous parametric down-conversion in a cavity. EPJ Web of Conf. **161**, 03018 (2017)
88. Usmanova L.S., Ziganshin M.A., Gorbatchuk V.V., Ziganshina S.A., Bizyaev D.A., Bukharaev A.A., Mukhametzyanov T.A., Gerasimov A.V.: A study of the formation of magnetically active solid dispersions of phenacetin using atomic and magnetic force microscopy. J. Adv. Pharm. Tech. Res. **8**, iss. 1, 2–7 (2017)
89. Usmanova L.S., Ziganshin M.A., Rakipov I.T., Lyadov N., Klimovitskii A.E., Muhametzyanov T.A., Gerasimov A.: Microspherical particles of solid dispersion of polyvinylpyrrolidone K29-32 for inhalation administration. BioMed Res. Int. (2018) (in press)
90. Vagizov F.G., Kiiamov A.G., Gavrilova T.P., Tagirov L.R.: Magnetic properties of chain antiferromagnets $RbFeSe_2$, $TlFeSe_2$, and $TlFeS_2$. Bull. Russ. Acad. Sci., Phys. **81**, 885–887 (2017)
91. Vagizov F.G., Shakhmuratov R.N., Zinnatullin A.L.: New applications of the Mössbauer effect. Bull. Russ. Acad. Sci., Phys. **81**, no. 7, 779–783 (2017)
92. Vasiliev A., Latypov M., Ziatdinov M.: Minimizing collisions for quantum hashing. J. Eng. Appl. Sci. **12**, no. 4, 877–880 (2017)
93. Yafarova G.G., Andrianov V.V., Yagudin R.K., Shaikhutdinov I.I., Gainutdinov K.L.: System of antioxidant protection in rat after spinal cord injury and production of nitric oxide. Eur. J. Clin. Invest. **47**, Suppl. 1, 55–56 (2017)
94. Yafarova G.G., Andrianov V.V., Yagudin R.Kh., Shaikhutdinov I.I., Gainutdinov Kh.L.: Effects of NO synthase blocker L-NAME on functional state of the neuromotor system during traumatic disease of the spinal cord. Bull. Exp. Biol. Med. **162**, no. 3, 316–319 (2017)
95. Yunusov A.V., Kashapov R.N., Kashapov L.N., Statsenko E.O.: Application of reverse engineering in the production of individual dental abutments. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. **240**, no. 1, 012036 (2017)
96. Zairov **R**., Khakimullina G., Podyachev S., Nizameev I., Safiullin G., Amirov R., Vomiero A., Mustafina A.: Hydration number: crucial role in nuclear magnetic relaxivity of Gd(III) chelate-based nanoparticles. Sci. Rep. **7**, iss. 1, art. no. 14010 (2017)
97. Zaripov R., Vavilova E., Khairuzhdinov I., Salikhov K., Voronkova V., Abdulmalic M.A., Meva F.E., Weheabby S., Rueffer T., Büchner B., Kataev V.: Tuning the spin coherence time of Cu(II)-(bis)oxamato and Cu(II)-(bis) oxamidato complexes by advanced ESR pulse protocols. Beilstein J. Nanotechnol. **8**, 943–955 (2017)
98. Zerentürk A., Açikgöz M., Kazan S., Yıldız F., Aktaş B., Khaibullin R.I., Rameev B.: Low temperature EPR investigation of Co^{2+} ion doped into rutile TiO_2 single crystal: Experiments and Simulations. J. Magn. Magn. Mater. **423**, 145–151 (2017)
99. Zerentürk A., Açikgöz M., Kazan S., Yıldız F., Khaibullin R.I., B. Rameev, B. Aktaş: Experimental and theoretical investigations on low temperature EPR of Cu^{2+} centers in TiO_2 rutile single crystal. **J. Alloys Compd. 710**, 836–842 (2017)
100. Ziganshin M.A., Safiullina A.S., Gerasimov A.V., Ziganshina S.A., Klimovitskii A.E., Khayarov K.R., Gorbatchuk V.V.: Thermally induced self-assembly and cyclization of L-Leucyl-L-Leucine in solid state. J. Phys. Chem. B. **121**, 8603−8610 (2017)
101. Ziganshin M.A., Safiullina A.S., Ziganshina S.A., Gerasimov A.V., Gorbatchuk V.V.: Non-zeolitic properties of the dipeptide L-leucyl-L-leucine as a result of the specific nanostructures formation. Phys. Chem. Chem. Phys. **19**, 13788–13797 (2017)
102. Zinnatullin A.L., Gumarov A.I., Gilmutdinov I.F., Valeev V.F., Khaibullin R.I., Vagizov F.G.: Magnetic and Mössbauer effect studies of ZnO thin film implanted with iron ions to high fluence. J. Phys.: Conf. Ser. **789**, art. no. 012072 (4 p.) (2017)

103. Баязитов А.А., Чумаров П.И., Фаттахов Я.В.: Приёмный радиочастотный квадратурный датчик "Шея" для магнитно-резонансного томографа. ПТЭ (2017) (в печати)
104. Борик М.А., Бублик В.Т., Ерёмина Р.М., Кулебякин А.В., Ломонова Е.Е., Милович Ф.О., Мызина В.А., Осико В.В., Табачкова Н.Ю., Фазлижанов И.И., Шустов В.А., Яцык И.В.: Влияние валентного состояния ионов Ce на фазовую стабильность и механические свойства кристаллов твёрдых растворов на основе ZrO_2. ФТТ **59**, вып. 10, 1914–1919 (2017)

105. Бринкевич Д.И., Харченко А.А., Бринкевич С.Д., Лукашевич М.Г., Оджаев В.Б., Валеев В.Ф., Нуждин В.И., Хайбуллин Р.И.: Радиационно-стимулированная модификация спектров отражения за областью пробега ионов в плёнках полиимида. Поверхность № 8, 17–22 (2017)
106. Важенин В.А., Потапов А.П., Шакуров Г.С., Фокин А.В., Артёмов М.Ю., Козловский В.И., Коростелин Ю.В., Пыталев Д.С.: Парамагнитные дефекты в кристаллах ZnSe, активированных ионами железа. ФТТ **59**, вып. 10, 1970–1977 (2017)
107. Васильев А.В., Василов А.Р., Латыпов М.А. Анализ свойств квантового хеширования. Современная математика и её приложения. Тематические обзоры **138**, 11–18 (2017)
108. Гайфуллин Р.Р., Деминов Р.Г., Тагиров Л.Р., Куприянов М.Ю., Голубов А.А.: Распределение функций спаривания в сверхпроводящем спиновом вентиле SF1F2. ФТТ **59**, № 11, 2095–2099 (2017)
109. Гатаулина А.Р., Хасанова Э.М., Басалаев А.С., Улахович Н.А., Кутырев Г.А., Юртаева С.В., Кутырева М.П.: Гиперразветвленные полиэфирополи[3-(морфолин-4-ил)]пропионаты и их металлокомплексы с ионами меди(II). ЖОХ **87**, вып. 9, 1515–1525 (2017)
110. Горюнов Ю.В., Натепров А.Н.: Влияние легирования европием на магнитные свойства 3D топологического полуметалла Cd_3As_2 по данным ЭСР. ФТТ **60**, № 1, 69–75 (2017)
111. Гречкин Я.А., Евтюгин В.Г., Зиганшина С.А., Юртаева С.В., Герасимов А.В., Улахович Н.А., Кутырева М.П.: Морфология наноразмерных соединений железа в матрице гиперразветвленных полиэфирополиолов. ЖНХ (2017) (в печати)
112. Дубровский А.А., Рауцкий М.В., Мошкина Е.М., Яцык И.В., Ерёмина Р.М.: Анизотропия *g*-фактора, определенная методом ЭПР, и магнитострикция монокристалла Cu_2MnBO_5 со структурой людвигита. Письма в ЖЭТФ **106**, вып. 11, 685–688 (2017)
113. Закарьяева А.Т., Карякин М.Е., Лапаев Д.В., Молостова Е.Ю., Князев А.А., Галяметдинов Ю.Г.: Определение относительного квантового выхода люминесценции растворов мезогенных комплексов европия в толуоле. Вестн. Казан. технолог. ун-та **20**, 19–22 (2017)
114. Иванова Т.А., Туранова О.А., Овчинников И.В., Мингалиева Л.В., Гильмутдинов И.Ф., Шустов В.А., Гафиятуллин Л.Г.: Межмолекулярные взаимодействия и спиновые состояния комплексов $[Fe(3\text{-}MeO\text{-}Qsal)_2]Y$ ($Y = PF_6$, BF_4). ЖНХ **62**, № 4, 476–482 (2017)
115. Иваньшин В.А., Гатауллин Э.М., Суханов А.А., Иваньшин Н.А.: Магнитное поведение нанофазы сплава $YbNi_2$. Физика металлов и металловедение **8**, № 4, 359–363 (2017)
116. Камашев А.А., Лексин П.В., Шуманн И., Томас И., Гемминг Т., Катаев В., Бюхнер Б., Гарифуллин И.А.: Оценка степени спиновой поляризации ферромагнетика по данным исследования эффекта близости сверхпроводник/ферромагнетик. Письма в ЖЭТФ **106**, вып. 12, 769–774 (2017)
117. Куковицкий Е.Ф., Львов С.Г.: Исследование разбавленных сплавов CuEr методом ЭПР. ФТТ. Физика материалов (2017) (в печати)
118. Лапаев Д.В., Зиятдинова Р.М., Князев А.А., Галяметдинов Ю.Г., Никифоров В.Г., Лобков В.С.: Светотрансформирующие и термосенсорные свойства застеклованной плёнки β-дикетонатного комплекса европия(III). Вестн. Казан. технолог. ун-та **20**, № 18, 26–28 (2017)
119. Лапаев Д.В., Зиятдинова Р.М., Никифоров В.Г., Лобков В.С.: Фотостабильность застеклованной плёнки β-дикетонатного комплекса тербия(III) в присутствии атмосферного кислорода**.** Вестн. Казан. технолог. ун-та **20**, 5–9 (2017)
120. Латыпова Р.И., Дулов Е.Н., Хайбуллин Р.И.: Микроструктура и магнитные свойства титаната стронция, имплантированного железом. Изв. РАН **81**, № 7, 892–897 (2017)
121. Мухаметшин А.В., Гумаров А.И., Янилкин И.В., Вахитов И.Р., Нуждин В.И., Вагизов Ф.Г., Лопатин О.Н., Хайбуллин Р.И., Тагиров Л.Р.: Имплантация ионов железа в кристаллическую структуру природного горного хрусталя. Учён. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки **159**, кн. 1, 5–20 (2017)
122. Павлов Д.П., Пиянзина И.И., Мухортов В.М., Балбашов А.М., Таюрский Д.А., Гарифуллин И.А., Мамин Р.Ф.: Двумерный электронный газ на границе сегнетоэлектрика $Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO_3$ и антиферромагнетика $LaMnO_3$. Письма в ЖЭТФ **106**, вып. 7, 440–444 (2017)
123. Подъячев С.Н., Гимазетдинова Г.Ш., Судакова С.Н., Лапаев Д.В., Сякаев В.В., Нагимов Р.Н.: Синтез 1,3-дикетопроизводных каликс[4]арена с нонильными заместителями на нижнем ободе – новых эффективных сенсибилизаторов люминесценции Tb^{3+}. ЖОХ **87**, 1476–1486 (2017)
124. Степанов А.Л., Нуждин В.И., Галяутдинов М.Ф., Валеев В.Ф., Курбатова Н.В., Воробьёв В.В., Осин Ю.Н.: Алмазная дифракционная решетка, сформированная ионной имплантацией. Изв. РАН, Сер. физ. (2017) (принята в печать)
125. Степанов А.Л., Нуждин В.И., Галяутдинов М.Ф., Курбатова Н.В., Валеев В.Ф., Воробьёв В.В., Осин Ю.Н.: Создание дифракционной решетки на алмазной подложке имплантацией ионами бора. Письма в ЖТФ **43**, вып. 2, 38–44 (2017)
126. Степанов А.Л., Осин Ю.Н., Нуждин В.И., Валеев В.Ф., Воробьёв В.В.: Синтез пористого кремния с наночастицами серебра методом ионной имплантации. Российские нанотехнологии (2017) (в печати)
127. Тарасов В.Ф., Суханов А.А., Дудникова В.Б., Жариков Е.В., Лис Д.А., Субботин К.А.: Димерная самоорганизация примесных ионов иттербия в монокристаллах синтетического форстерита. Письма в ЖЭТФ **106**, вып. 2, 78–83 (2017)

128. Фаррахов Б.Ф., Фаттахов Я.В., Галяутдинов М.Ф., Степанов А.Л.: Оптическая дифракционная методика регистрации температуры твёрдых тел на базе ПММА. Материаловедение **2**, 20–23 (2017)
129. Фатыхов Р.Р., Хантимеров С.М., Сулейманов Н.М.: Перспективы применения литий-ионных аккумуляторов в качестве резервных источников питания на электрических станциях. Вестн. Казан. гос. энеретич. ун-та (2017) (в печати)
130. Ханипов Т.Ф., Бизяев Д.А., Бухараев А.А.: Исследование поведения оси лёгкого намагничивания Py частицы при механическом напряжении методами MOKE и MFM. Сб. статей "Когерентная оптика и оптическая спектроскопия", вып. 21, 65–68 (2017)
131. Шагалов В.А., Фахрутдинов А.Р., Фаттахов Я.В.: Радиоспектрометр для магнитно-резонансного томографа. ПТЭ, № 6, 132–133 (2017)
132. Шакуров Г.С., Хайбуллин Р.И., Томас В.Г., Фурсенко Д.А., Машковцев Р.И., Лопатин О.Н., Николаев А.Г., Горшунов Б.П., Жукова Е.С.: Субмиллиметровые спектры ЭПР иона Fe^{2+} в кристаллах синтетического и природного бериллов. ФТТ **59**, вып. 8, 1576–1582 (2017)
133. Шмелёв А.Г., Леонтьев А.В., Жарков Д.К., Никифоров В.Г., Лобков В.С., Самарцев В.В.: Фемтосекундная спектроскопия квантовых точек на основе халькогенидов кадмия. Изв. РАН, Сер. физ. **81**, 601–605 (2017)

Материалы и тезисы конференций

1. Anisimova E.E.: Peculiarities of the multi-pulse protocols in solid state ^{1}H NMR in Cu(II)-oxamidato complex. Материалы конф. молодых учёных "Молодёжь и инновации Татарстана", p. 37–38. Казань: Изд-во Казан. ун-та 2017
2. Stepanov A.L., Nuzhdin V.I., Valeev V.F., Kurbatova N.V., Galyautdinov M.F.: Nanostructuring of diamond and optical diffraction grid formation by boron ion implantation, in: "Physics, Chemistry and Application of Nanostructures". Reviews and Short Notes to Nanomeeting-2017 (V. E. Borisenko, S. V. Gaponenko, V. S. Gurin, C. H. Kam, eds.). Singapore: Singapore World Sci. Publ., p. 437–440, 2017.
3. Асатрян Г.Р., Шакуров Г.С.: Электронный парамагнитный резонанс Ce-содержащих кристаллов $Y_3Al_5O_{12}$. Материалы XXIII Междунар. науч. конф."Оптика и спектроскопия конденсированных сред", с. 101–104. Краснодар: Изд-во КубГУ 2017.
4. Базаров В.В., Нуждин В.И., Валеев В.В., Степанов А.Л.: Наблюдение методом спектральной эллипсометрии аморфного кремния, облученного низкими дозами ионов серебра. Материалы 12-й Междунар. конф. "Взаимодействие излучений с твёрдым телом" (Углов В.В., отв. ред.), с. 304–305. Минск: Изд. центр БГУ 2017.
5. Бакиров М.М.: К алгоритму определения константы скорости спинового обмена из анализа формы спектра ЭПР раствора парамагнитных зодов. Материалы конф. молодых учёных "Молодёжь и инновации Татарстана", с. 13–14. Казань: Изд-во Казан. ун-та 2017
6. Баталов Р.И., Баязитов Р.М., Новиков Г.А., Файзрахманов И.А., Шустов В.А., Ивлев Г.Д.: Структура и фотопроводимость сильно легированных слоёв Ge:Sb, сформированных на подложках Si и Ge ионным распылением и импульсными обработками. Материалы 12-й Междунар. конф. "Взаимодействие излучений с твёрдым телом" (Углов В.В., отв. ред.), с. 202–204. Минск: Изд. центр БГУ 2017.
7. Баталов Р.И., Баязитов Р.М., Нуждин В.И., Валеев В.Ф., Воробьёв В.В., Осин Ю.Н., Ивлев Г.Д., Степанов А.Л.: Создание методами ионной имплантации и импульсного лазерного отжига композитных слоёв Si и GeSi с наночастицами Ag. Материалы 12-й Междунар. конф. "Взаимодействие излучений с твёрдым телом" (Углов В.В., отв. ред.), с. 306–308. Минск: Изд. центр БГУ 2017.
8. Баязитов А.А., Хундиряков В.Е.: Разработка приёмно-передающего датчика малого объёма для специализированных малогабаритных магнитно-резонансных томографов. Сб. статей XXIV Всероссийской конф. "Структура и динамика молекулярных систем", с. 63–67. Йошкар-Ола: ПГТУ 2017
9. Баязитов Р.М., Баталов Р.И., Новиков Г.А., Файзрахманов И.А., Шустов В.А., Воробьёв В.В., Осин Ю.Н., Ивлев Г.Д.: Воздействие мощных импульсных иоС инных и лазерных пучков на гетероструктуру n^+-Ge:Sb/p-Ge. Труды XXVII Междунар. конф. "Радиационная физика твёрдого тела" (Бондаренко Г.Г., ред.), с. 88–97. М.: ФГБНУ "НИИ ПМТ" 2017.
10. Бедин С.А., Бизяев Д.А., Бухараев А.А.: Магнитно-силовая микроскопия нанопроволок железа в полимерной матрице. Abstract Book of International Conference "Scanning Probe Microscopy", p. 254–255. Ekaterinburg: Ural Federal University 2017.
11. Бизяев Д.А., Бухараев А.А., Бедин С.А., Загорский Д.Л., Долуденко И.М.: Магнитно-силовая микроскопия в исследовании металлических нанопроволок, полученных репликацией пор в трековой полимерной матрице. Материалы 12-й Междунар. конф. "Взаимодействие излучений с твёрдым телом" (Углов В.В., отв. ред.), с. 309–311. Минск: Изд. центр БГУ 2017.
12. Бухараев А.А., Бизяев Д.А., Зиганшина С.А., Нургазизов Н.И., Ханипов Т.Ф., Чукланов А.П., Чирков В.В.: Исследование магнитоупругих свойств ферромагнитных микрочастиц методами магнитополяриметрии, МСМ и ФМР. Труды XXI Междунар. симпозиума "Нанофизика и наноэлектроника" (Новиков А., отв. ред.; Гапонов С., Красильник З., науч. ред.), с. 141–142. Нижний Новгород: Изд-во ННГУ 2017.
13. Бухараев А.А.: Использование магнитоупругого эффекта в наноструктурах для хранения и обработки

информации. Труды XXI Междунар. симпозиума “Нанофизика и наноэлектроника” (Новиков А., отв. ред.; Гапонов С., Красильник З., науч. ред.), с. 139–140. Нижний Новгород: Изд-во ННГУ 2017.

14. Важенин В.А., Потапов А.П., Шакуров Г.С., Фокин А.В., Артёмов М.Ю., Козловский В.И.: Точечные дефекты в монокристаллах селенида цинка с примесью железа. Материалы XXIII Междунар. науч. конф. “Оптика и спектроскопия конденсированных сред”, с. 105–110. Краснодар: Изд-во КубГУ 2017.
15. Воробьёв В.В.: Эффект усиления комбинационного рассеяния света на ионносинтезированных наночастицах серебра. Материалы конф. молодых учёных “Молодёжь и инновации Татарстана”, с. 39–43. Казань: Изд-во Казан. ун-та 2017
16. Гаврилова Т.П., Ерёмина Р.М., Гильмутдинов И.Ф., Лядов Н.М., Кабиров Ю.В., Гавриляченко В.Г., Пруцакова Н.В.: Магнитные свойства гетерогенных материалов на основе манганитов. Сб. докладов 20-го Междунар. междисциплинарного симпозиума “Порядок, беспорядок и свойства оксидов”, с. 106–109. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ 2017.
17. Гаврилова Т.П., Яцык И.В., Парфёнов В.В., Ерёмина Р.М.: Магнитные свойства манганита гольмия. Сб. докладов 20-го Междунар. междисциплинарного симпозиума “Порядок, беспорядок и свойства оксидов”, с. 43–44. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ 2017.
18. Гарипов Р.Р.: Разработка электропроводящего композиционного материала на основе полимера и углеродных нанотрубок. Материалы конф. молодых учёных “Молодёжь и инновации Татарстана”, с. 17–18. Казань: Изд-во Казан. ун-та 2017
19. Головчук В.И., Гумаров А.И., Бумай Ю.А., Валеев В.Ф., Лукашевич М.Г., Нуждин В.И., Оджаев В.Б., Харченко А.А., Хайбуллин Р.И.: Модификация оптических свойств оксида цинка имплантацией ионов кобальта. Материалы 12-й Междунар. конф. “Взаимодействие излучений с твёрдым телом” (Углов В.В., отв. ред.), с. 225–227. Минск: Изд. центр БГУ 2017.
20. Гумаров А.И., Валеев В.Ф., Головчук В.И., Лядов Н.М., Лукашевич М.Г., Нуждин В.И., Тагиров Л.Р., Файзрахманов И.А., Хайбуллин Р.И.: К вопросу о природе ферромагнетизма в оксиде цинка, имплантированном ионами кобальта. Материалы 12-й Междунар. конф. “Взаимодействие излучений с твёрдым телом” (Углов В.В., отв. ред.), с. 231–233. Минск: Изд. центр БГУ 2017.
21. Жарков Д.К., Никифоров В.Г., Шмелёв А.Г., Леонтьев А.В., Лобков В.С.: Фемтосекундная время-разрешенная селективная спектроскопия внутримолекулярной и межмолекулярной динамики в жидкостях на основе сверхбыстрого оптического эффекта Керра. Сборник тезисов XI Междунар. симп. по фотонному эхо и когерентной спектроскопии (ФЭКС), с. 94–95. МО, г. Троицк: Тровант 2017.
22. Ивлев Г.Д., Прокопьев С.Л., Гацкевич Е.И., Файзрахманов И.А.: Импульсная лазерная обработка и лазерно-индуцированная проводимость тонкоплёночного германия. Материалы 12-й Междунар. конф.“Взаимодействие излучений с твёрдым телом” (Углов В.В., отв. ред.), с. 244–246. Минск: Изд. центр БГУ 2017.
23. Камашев А.А.: Возможность генерации спин-поляризованного тока в сверхпроводящем слое. Материалы конф. молодых учёных “Молодёжь и инновации Татарстана”, с. 44–45. Казань: Изд-во Казан. ун-та 2017
24. Климович И.М., Зайков В.А., Романов И.А., Комаров Ф.Ф., Осин Ю.Н., Воробьёв В.В., Степанов А.Л.: Влияние потенциала смещения и нагрева подложки на оптические свойства Si-покрытий, формируемых методом магнетронного распыления. Материалы IX Междунар. науч. конф. “VII Белорусский космический конгресс” (Тузиков А.В., науч. ред.), т. 1, с. 84–87. Минск: ОИПИ НАН Беларуси 2017.
25. Климович И.М., Зайков В.А., Романов И.А., Осин Ю.Н., Рогов А.М., Степанов А.Л.: Формирование оптически-прозрачных кремниевых покрытий методом магнетронного распыления. Материалы 12-й Междунар. конф. “Взаимодействие излучений с твёрдым телом” (Углов В.В., отв. ред.), с. 329–330. Минск: Изд. центр БГУ 2017.
26. Лапаев Д.В., Никифоров В.Г., Лобков В.С., Князев А.А., Галяметдинов Ю.Г.: Перспективы использования мезогенных β-дикетонатных комплексов лантаноидов(III) в качестве материалов молекулярной фотоники. Тезисы XIV Междунар. конф. “Спектроскопия координационных соединений”, с. 180–181. Туапсе, 2017.
27. Леонтьев А.В., Нуртдинова Л.А., Жарков Д.К., Шмелёв А.Г., Лобков В.С.: Пикосекундная динамика фотовозбужденных состояний в кристаллах Ce^{3+}:$LiY_xLu_{(1-x)}F_4$. Сборник тезисов XI Междунар. симпозиума по фотонному эхо и когерентной спектроскопии (ФЭКС), с. 171–172. МО, г. Троицк: Тровант 2017.
28. Морозова А.С., Зиганшина С.А., Бухараев А.А., Зиганшин М.А.: Самоорганизация трипептида L-глицил- L-глицил -L-глицин в плёнках до и после взаимодействия с парами органических веществ по данным АСМ. Abstract Book of International Conference “Scanning Probe Microscopy”, p. 188–189. Ekaterinburg: Ural Federal University 2017.
29. Морозова А.С., Зиганшина С.А., Бухараев А.А., Зиганшин М.А.: Самоорганизация трипептида L-глицил- L-глицил -L-глицин в плёнках до и после взаимодействия с парами органических веществ. Тезисы Междунар. молодежной конф. “ФизикА”, с. 106–107. С.-Петербург: Изд-во ФТИ им. А. Ф. Иоффе 2017.
30. Мухаметшин А.В., Лопатин О.Н., Николаев А.Г., Галиуллин Б.М., Нуждин В.И., Хайбуллин Р.И.: Имплантация ионов ванадия в структуру природного горного хрусталя. Матер. Юбилейного съезда Российского минералогического общества “200 лет РМО”, т. 2, с. 124–125. С.-Петербург 2017.

31. Никифоров В.Г., Лапаев Д.В., Лобков В.С., Князев А.А., Галяметдинов Ю.Г., Шухина К.Л.: Влияние фотохимических и фотофизических процессов на люминесцентные свойства пленок β-дикетонатных комплексов лантаноидов(III). Тезисы XIV Междунар. конф. “Спектроскопия координационных соединений”, с. 221–222. Туапсе, 2017.
32. Николаев А.Г., Лопатин О.Н., Хайбуллин Р.И., Нуждин В.И., Мухаметшин А.В.: Ионная имплантация минералов и их синтетических аналогов: современное состояние и перспективы. Матер. Юбилейного съезда Российского минералогического общества “200 лет РМО”, т. 1, с. 395–397. С.-Петербург, 2017.
33. Нургазизов Н.И., Бизяев Д.А., Бухараев А.А., Чукланов А.П.: Исследование изменения поля анизотропии пермаллоевых микрочастиц при их механическом напряжении методами МСМ. Abstract Book of International Conference “Scanning Probe Microscopy”, p. 29–30. Ekaterinburg: Ural Federal University 2017.
34. Рогов А.М., Воробьёв В.В., Осин Ю.Н., Нуждин В.И., Валеев В.Ф., Степанов А.Л.: Сканирующая зондовая микроскопия кремниевых слоёв, имплантированных ионами серебра. Abstract Book of International Conference “Scanning Probe Microscopy”, p. 115–116. Ekaterinburg: Ural Federal University 2017.
35. Самарцев В.В., Митрофанова Т.Г.: Коррелированные наведённые электронные и спиновые “решетки” и их применение в фемтосекундной когерентной спектроскопии и спинтронике. Сб. статей XXI Междунар. молодежной науч. школы “Когерентная оптика и оптическая спектроскопия” (Салахов М.Х., ред.), с. 36–41. Казань: Изд. “ФЭН” АН РТ 2017.
36. Самарцев В.В., Митрофанова Т.Г.: Коррелированные сигналы кластерной суперфлуоресценции при двух- и трёхквантовом возбуждении наноструктур CdSe/CdS скрещенными наносекундными лазерными пучками. Сб. статей XXI Междунар. молодежной науч. школы “Когерентная оптика и оптическая спектроскопия” (Салахов М.Х., ред.), с. 50–55. Казань: Изд. “ФЭН” АН РТ 2017.
37. Степанов А.Л.: Новые перспективные материалы для солнечных элементов на основе пористого кремния с наночастиами серебра, сформированных ионной имплантацией. Материалы IX Междунар. науч. конф. “VII Белорусский космический конгресс” (Тузиков А.В., науч. ред.), т. 1, с. 50–54. Минск: ОИПИ НАН Беларуси 2017.
38. Степанов А.Л.: Создание тонкоплёночных дифракционных решеток на алмазе и других диэлектриках при помощи ионной имплантации. II Научный форум “Телекоммуникации: теория и технология ТТТ-2017”. Материалы XVIII Междунар. науч.-технич. конф. “Проблема техники и технологий телекоммуникаций ПТиТТ-2017”, т. 1, с. 73–74. Казань, КНИТУ-КАИ 2017.
39. Таланов Ю.И., Гимазов И.И., Сахин В.О., Adachi T., Noji T., Koike Y.: Поглощение микроволн кристаллами ВТСП в псевдощелевом состоянии. Труды XXI Междунар. симпозиума “Нанофизика и наноэлектроника” (Новиков А., отв. ред.; Гапонов С., Красильник З., науч. ред.), с. 112–113. Нижний Новгород: Изд-во ННГУ 2017.
40. Тарасов В.Ф., Соловаров Н.К., Жариков Е.В., Субботин К.А.: Эффект квантовых биений в стационарной ЭПР-спектроскопии. Материалы XXIII Междунар. науч. конф. “Оптика и спектроскопия конденсированных сред”, с. 97–100. Краснодар: Изд-во КубГУ 2017.
41. Фаррахов Б.Ф., Фаттахов Я.В., Галяутдинов М.Ф., Степанов А.Л.: Дилатометрия полиметилметакрилата при низких температурах. Сб. материалов VII Междунар. конф. “Деформация и разрушение материалов и наноматериалов”, с. 771–772. –М.: ИМЕТ РАН 2017.
42. Фатыхов Р.Р.: Разработка анодного материала для литий-ионных аккумуляторов с улучшенными удельными характеристиками. Материалы конф. молодых учёных “Молодёжь и инновации Татарстана”, с. 35–36. Казань: Изд-во Казан. ун-та 2017
43. Чирков В.В., Гумаров Г.Г., Коновалов Д.А., Петухов В.Ю.: Регистрация эффекта Керра с использованием программного синхронного детектирования. Труды XXVII Междунар. конф. “Радиационная физика твёрдого тела” (Бондаренко Г.Г., ред.), с. 301–305. М.: ФГБНУ “НИИ ПМТ” 2017
44. Чирков В.В., Гумаров Г.Г., Петухов В.Ю., Бакиров М.М., Валеев В.Ф.: Исследование магнитной анизотропии пленок, полученных при имплантации ионов Co^+ в Si в магнитном поле. Proceedings of the 12th International Conference “Interaction of Radiation with Solids”, vol. 1. p. 351–352. Minsk: Belarussian State University 2017
45. Шакуров Г.С., Важенин В.А., Потапов А.П., Исаев В.А., Лебедев А.В., Аванесов С.А., Мигачёв С.А.: Широкополосная ЭПР-спектроскопия кристалла YAG:Cr. Материалы XXIII Междунар. науч. конф. “Оптика и спектроскопия конденсированных сред”, с. 207–210. Краснодар: Изд-во КубГУ 2017.
46. Юртаева С.В., Ефимов В.Н., Сальников В.В.: ЭПР-спектроскопия биогенных кристаллических оксидов железа в биологических тканях. Сб. трудов XII Междунар. науч.-технич. конф. “Актуальные вопросы биологической физики и химии” с. 360–365. Севастополь: СевГУ 2017.
47. Юртаева С.В., Ефимов В.Н., Яфарова Г.Г., Сальников В.В., Фахрутдинов А.Р.: Кристаллические формы оксидов железа в патологических тканях. Сб. трудов IX Российской науч.-практич. конф. “Здоровье человека в XXI веке” (Ксембаев С.С., ред.), с. 300–304. Казань: Изд-во “Бриг” 2017.

Патенты

1. Аминов К.Л., Хабипов Р.Ш.,Фаттахов Я.В., Фахрутдинов А.Р., Шагалов В.А.: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017662413. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 07.11.2017.
2. Степанов А.Л., Нуждин В.И., Валеев В.Ф., Галяутдинов М.Ф.: Патент на изобретение № 2630032 “Оптическое термометрическое устройство на полимерной основе”. Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 05.09.2017.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2630032

ОПТИЧЕСКОЕ ТЕРМОМЕТРИЧЕСКОЕ УСТРОЙСТВО НА ПОЛИМЕРНОЙ ОСНОВЕ

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского Казанского научного центра Российской Академии наук (КФТИ КазНЦ РАН) (RU)*

Авторы: *Степанов Андрей Львович (RU), Нуждин Владимир Иванович (RU), Валеев Валерий Фердинандович (RU), Галяутдинов Мансур Фаляхутдинович (RU)*

Заявка № **2016107270**
Приоритет изобретения **29 февраля 2016 г.**
Дата государственной регистрации в Государственном реестре изобретений Российской Федерации **05 сентября 2017 г.**
Срок действия исключительного права на изобретение истекает **29 февраля 2036 г.**

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2017662413

Программный комплекс для управления и настройки оборудования медицинского магнитно-резонансного томографа

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Казанский физико-технический институт им. Е.К.Завойского Казанского научного центра Российской академии наук (RU)*

Авторы: *Аминов Камиль Липарович (RU), Хабипов Рамиль Шаригзянович (RU), Фаттахов Яхья Валиевич (RU), Фахрутдинов Альберт Ринатович (RU), Шагалов Валерий Александрович (RU)*

Заявка № **2017616677**
Дата поступления **10 июля 2017 г.**
Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ **07 ноября 2017 г.**

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

Защиты, награды

Защита диссертаций

В 2017 году кандидатскую диссертацию защитили:
- Бизяев Дмитрий Анатольевич
  Создание и исследование магнитных микро- и наноструктур методами сканирующей зондовой микроскопии
  01.04.11 – физика магнитных явлений
- Воробьёва Валерия Евгеньевна
  ЭПР исследование железосодержащих дендримеров с термо- и фотоуправляемыми свойствами
  01.04.11 – физика магнитных явлений
- Леонтьев Андрей Владимирович
  Сверхбыстрая динамика фотовозбужденных состояний фталоцианина и сульфида кадмия при комнатной температуре
  01.04.05 – оптика

Награждения

Указом Президента РФ от 5 сентября 2017 г. № 416 “О награждении государственными наградами Российской Федерации” научный руководитель КФТИ КазНЦ РАН, академик Кев Минуллинович Салихов награждён Орденом “За заслуги перед Отечеством” III степени за большой вклад в развитие науки, образования, подготовку квалифицированных специалистов и многолетнюю добросовестную работу.

Благодарственные письма КФТИ за большой вклад в развитие института вручены следующим сотрудникам:
- Баязитову Р.М., д.ф.-м.н.,
- Вишневской Г.П., д.ф.-м.н.,
- Гарифуллину И.А., д.ф.-м.н.,
- Лисину В.Н., к.ф.-м.н.,
- Лобкову В.С., к.ф.-м.н.,
- Салихову К.М., академику, научному руководителю института,
- Тейтельбауму Г.Б., д.ф.-м.н.,
- Овчинникову И.В., д.ф.-м.н.,
- Шегеде А.М., к.ф.-м.н.

Премия им. М. Л. Блатта (КФТИ КазНЦ РАН) присуждена
- Ахмину С.М., ведущему научному редактору редакционно-издательской группы

Звание “Ветеран КФТИ” за многолетний добросовестный труд на благо института присвоено следующим сотрудникам:
- Вороновой Л.В., ведущему инженеру,
- Гурьяновой О.М., инженеру-исследователю,
- Хисамову А.Р., инженеру по защите информации,
- Коновалову Д.А., к.ф.-м.н., рук. группы информационной безопасности, телекоммуникационных и сетевых технологий,
- Гумарову Г.Г., к.ф.-м.н.,
- Закирову А.Э., инженеру-исследователю,
- Губайдуллиной А.З., секретарю,
- Мамину Р.Ф., зам. директора,
- Шамсутдиновой З.З., вед. экономисту.

Участие сотрудников института в преподавательской деятельности

В 2017 году сотрудники КФТИ КазНЦ РАН, помимо основной научно-исследовательской работы, занимались преподавательской деятельностью в различных вузах г. Казани, где читали следующие учебные курсы:

Баязитов Р.М., проф. каф. приборостроения и автоматизации электропривода КГЭУ
– Элементы систем автоматики
– Источники и приёмники излучений

Бухараев А.А., проф. каф. оптики и нанофотоники Института физики КФУ
– Спектроскопические и зондовые методы исследования наноструктур
– Современные методы синтеза и исследования наноструктур
– Введение в нанотехнологии

Воробьёва В.Е., ассистент кафедры вычислительной физики и моделирования физических процессов Института физики КФУ
– Информационные технологии
– Инженерная графика
– Концепция современного естествознания
– Естественнонаучная картина мира

Гайнутдинов Х.Л., проф. каф. физиологии Института фундаментальной медицины и биологии КФУ
– Медицинская биофизика

Ерёмина Р.М., доц. каф. общей физики Института физики КФУ
– Оптика
– Электричество и магнетизм
– История и методология физики

Калачёв А.А., проф. каф. оптики и нанофотоники Института физики КФУ
– Квантовая оптика
– Квантовые компьютеры
– Физика лазеров

Петухов В.Ю., проф. каф. физики твёрдого тела Института физики КФУ
– Радиационная физика
– Радиационная физика в медицине
– Физика поверхности и тонких плёнок

Савостина Л.И., доц. каф. хим. физики Института физики КФУ
– Гидравлика
– Химическая кинетика и катализ

Сулейманов Н.М., проф. каф. физики КГЭУ
– Физические основы энергетики

Тарасов В.Ф., проф. каф. пром. электроники КГЭУ
– Физические основы электроники

Конференции, организованные КФТИ и при участии КФТИ

1. XII Международная научная школа “Наука и инновации-2017” ISS “SI-2017”, 10–16 июля 2017, Йошкар-Ола, Россия (совместно с Казанским (Приволжским) федеральным университетом, Поволжским государственным технологическим университетом, Марийским государственным университетом, Чувашским государственным университетом им. И. Н Ульянова, Институтом спектроскопии РАН, Российским фондом фундаментальных исследований, Министерством образования и науки Республики Марий Эл, Российской академией естествознания, научно-техническим советом Государственной корпорации “Ростех”, Фондом содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере)
2. XXI Международная молодёжная научная школа “Когерентная оптика и оптическая спектроскопия”, 17–19 октября 2017, Казань, Россия (совместно с Казанским (Приволжским) федеральным университетом, Академией наук Республики Татарстан, Российским фондом фундаментальных исследований)
3. XXI Всероссийская конференция по физике сегнетоэлектриков (ВКС-XXI), 25–30 июня 2017, Казань (совместно с Казанским (Приволжским) федеральным университетом, Министерством образования и науки РФ, Федеральным агентством научных организаций, Российской академией наук, Научным советом РАН по физике конденсированных сред)
   В рамках конференции проведены:
   – Международный семинар “Фазовые переходы и неоднородные состояния в оксидах 2017” (International Workshop PTISO17);
   – Школа молодых учёных “Актуальные проблемы физики сегнетоэлектриков”

4. International Symposium “Modern Development of Magnetic Resonance”, September 25–29, 2017, Kazan, Russia (совместно с Казанским (Приволжским) федеральным университетом, Академией наук Республики Татарстан)
5. Республиканская конференция молодых учёных “Молодёжь и инновации Татарстана”, 26–27 октября 2017, Казань (совместно с Казанским (Приволжским) федеральным университетом, Министерством образования и науки Республики Татарстан, Инновационно-производственным технопарком “Идея”, Академией наук Республики Татарстан, Инвестиционно-венчурныv фондом РТ, Казанским научный центром РАН)
6. Итоговая научная конференция КазНЦ РАН, 4–5 декабря 2017 г. (стендовая сессия), 7 февраля 2018 г. (устная сессия), Казань

Программы конференций, организованных институтом

International Symposium “Modern Development of Magnetic Resonance”

September 25th, 2017

Zavoisky Award 2016 Lectures

Takui T.: Topological High-Spin Organic Chemistry and Molecular Spin-Qubit Quantum Technology Underlain by Electron Magnetic Resonance

Plenary Session

Chair: K. M. Salikhov

Ohta H.: Multi-Extreme THz ESR: Developments and Future Biological Applications

Smirnov A.I.: Spinon Magnetic Resonance in a Quasi 1D $S = 1/2$ Antiferromagnet with a Weak Exchange Interaction

September 26th, 2017

Plenary Session

Chair: M. Bowman

Bagryanskaya E.G.: A Pulse Dipole EPR-Based Distance Measurements at Ambient Temperatures

Huber M.: EPR Methods to Determine Properties of Intrinsically Disordered Proteins

Session: Low-Dimensional Systems and Nano-Systems

Chair: V. A. Atsarkin

Invited Talks

Ryazanov V.V., Golovchanskiy I.A., Bolginov V.V., Abramov N.N., Chichkov V.I.: Magnetoresistive and Microwave Responses of Hybrid Josephson Structures with Ferromagnetic Layers

Mel’nikov A.S.: Dynamics of Majorana States in Nanowires and Josephson Junctions

Karashtin E.A., Gusev N.S., Sladkov K.D., Kolmychek I.A., Murzina T.V., Fraerman A.A.: Spin Current and Second Harmonic Generation in Noncollinear Magnets

Svistov L.E., Gotovko S.K., Soldatov T.A., Zhou H.D.: Electric Field Controlled ESR in Multiferroic $CuCrO_2$

Oral Talks

Zvereva E.A., Raganyan G.V., Nalbandyan V.B., Evstigneeva M.A., Streltsov S.V., Kurbakov A.I., Kuchugura M.A., Vasiliev A.N.: Magnetic Properties of New Chiral 2D Magnet $MnSnTeO_6$

Session: Theory of Magnetic Resonance

Chair: E. B. Fel’dman

Invited Talks

Dzheparov F.S., Lvov D.V.: Magnetic Resonance of Impurity Spin in Slow Normal Stochastic Local Field

Maryasov A.G., Veber S.L., Fedin M.V.: Manipulations of High Spin Kramers System States by Circularly Polarized MW Fields

Fine B.: Reversing Chaotic Dynamics of Nuclear Spins

Oral Talks

Tupikina E.Yu., Efimova A.A., Denisov G.S., Tolstoy P.M.: Probing of Fluorine Atom Electronic Shell by means of Topological Analysis of Helium Chemical Shift Surfaces

Session: Spin-Based Information Processing

Chair: A. A. Kalachev

Invited Talks

Yamane T., Sugisaki K., Nakagawa T., Matsuoka H., Nishio T., Kinjyo S., Mori N., Yokoyama S., Kawashima C., Yokokura N., Sato K., Kanzaki Y., Shiomi D., Toyota K., Dolphin D.H., Lin W.C., McDowell C.A., Tadokoro M., Takui T.: Exact Analytical and Genuine Zeeman Perturbation Approaches to the Eigen-Energies and -Functions of the ZFS and Electronic Zeeman Interaction Hamiltonian for the Spin Quantum Numbers up to $S = 7/2$: Applications to High Spin Metalloporphyrins and a Re(III, IV) Complex with Sizable ZFS Values and Quantum Chemical Calculations

Sato K., Yamamoto S., Hirao R., Tanimoto K., Hosseini E., Nakazawa S., Toyota K., Shiomi D., Ivanov K., Takui T.: Molecular Spin Technology Based on Microwave Pulse with Arbitrary Waveform towards Spin Quantum Computing

Bochkin G.A., Fel'dman E.B., Vasil'ev S.G., Volkov V.I.: Decoherence in Many-Qubit Clusters in Multiple Quantum NMR in One-Dimensional Systems

Oral Talks

Akhmedzhanov R.A., Gushchin L.A., Nizov N.A., Nizov V.A., Sobgayda D.A., Zelensky I.V.: Cross Relaxation Magnetometry with Diamond NV Centers

Baibekov E.I.: Electron-Electron and Electron-Nuclear Interactions in the Context of Spin-Based Quantum Computing

Session: Low-Dimensional Systems and Nano-Systems

Chair: A. A. Fraerman

Invited Talk

Ziatdinov A.M.: The Influence of Adsorbate and Edge Covalent Bonds on Topological Zero Modes in Few-Layer Nanographenes

Oral Talks

Skorohodov E.V., Volodin A.P., Gorev R.V., Mironov V.L.: Localized Ferromagnetic Resonance of Domain Wall in Curved Nanostripe

Soldatov T.A., Smirnov A.I., Povarov K.Yu., Wulf E., Mannig A., Zheludev A.: ESR of a Doped Quasi-One-Dimensional $S = 1$ Antiferromagnet with Two Coupled Antiferromagnetic Sublattices

Panich A.: Nuclear Magnetic Resonance Studies of Nano-Diamond Surface Modification

Alakshin E.M., Dolgorukov G.A., Klochkov A.V., Kondratyeva E.I., Kuzmin V.V., Nuzhina D.S., Safiullin K.R., Stanislavovas A.A., Tagirov M.S.: ^{3}He NMR in Nanostructures: Latest Progress

Yakushkin S.S., Balaev D.A., Bukhtiyarova G.A., Martyanov O.N.: The Formation of Epsilon-Fe_2O_3/SiO_2 Nanoparticles: Spatial Stabilization and the Size Effect

Session: Molecular Magnets and Liquid Crystals

Chair: V. K. Voronkova

Invited Talk

Shi F.: Spin Magnetic Resonance Spectroscopy from Billions of Molecules to a Single Molecule

Oral Talk

Vieru V., Ungur L., Cemortan V., Sukhanov A., Baniodeh A., Mereacre V., Anson C.E., Powell A.K., Voronkova V., Chibotaru L.F.: Magnetic Properties, EPR and *ab initio* Investigation of a Series of Isostructural $Fe_2^{III}Dy_2^{III}$ Complexes

Session: Modern Methods of Magnetic Resonance

Chair: M. S. Tagirov

Invited Talks

Dvinskikh S.V.: Characterization of Liquid-Crystalline Materials by Separated Local Field Methods

Rameev B.: Novel Approaches in Magnetic Resonance & Microwave Detection of Energetic and Illicit Material

September 27th, 2017

Plenary Lectures

Chair: K. Sato

Khaliullin G.: Soft Spins and Higgs Mode in Ruthenates

Bittl R.: Insight into Protein Function by EPR

Session: Strong Correlated Electron System

Chair: G. B. Teitel'baum

Invited Talks

Kataev V.: Signatures of Fractionalized Spin Excitations in the Proximate Quantum Spin Liquid α-$RuCl_3$ from Sub-THz Spectroscopy in Strong Magnetic Fields

Demishev S.V., Krasnorussky V.N., Glushkov V.V., Semeno A.V., Gilmanov M.I., Bogach A.V., Samarin A.N., Samarin N.A., Sluchanko N.E., Shitsevalova N.Yu., Filipov V.B.: Electron Nematic Effect in CeB_6: The ESR and Magnetoresistance Evidence

Oral Talks

Iakovleva M., Vavilova E., Grafe H.-J., Alfonsov A., Büchner B., Skourski Y., Nath R., Kataev V.: Investigation of a Field Induced Magnetic Transition in the Low-Dimensional Magnet $BiCoPO_5$

Demishev S.V., Gilmanov M.I., Samarin A.N., Semeno A.V., Sluchanko N.E., Shitsevalova N.Yu., Filipov V.B., Glushkov V.V.: Magnetic Resonance in the Strongly Correlated Topological Insulator SmB_6

Anishchik S.: ODMR and LAC Spectroscopy of Nitrogen-Vacancy Centers in Diamond

Session: Magnetic Resonance Imaging

Chair: K. Il'yasov

Invited Talk

Eichhoff U.: MRI and Emotion

Oral Talks

Volkov D.V., Gulyaev M.V., Gervits L.L., Silachev D.N., Anisimov N.V., Chernyaev A.P., Pirogov Yu.A.: Several Aspects of ^{19}F Gastrointestinal MRI

Bayazitov A.A., Khundiryakov V.E., Fattakhov Ya.V., Sitdikov I.R., Fakhrutdinov A.R., Shagalov V.A., Khabipov R.Sh., Anikin A.N.: The Design of the Receiving Coils for Specialized MRI

Session: Magnetic Resonance Instrumentation

Chair: I. A. Garifullin

Invited Talk

Zick K.: Latest Developments in Pulsed Field Gradient and High Speed Magic Angle Spinning NMR

Tseytlin M.: Rapid Scan EPR

Session: Electron Spin Based Methods for Electronic and Spatial Structure Determination in Physics, Chemistry and Biology

Chair: R. Bittl

Invited Talks

Salikhov K.M.: Manifestations of the Collective Motion of Spins Induced by Stochastic Relaxation Processes

Matsuoka H., Retegen M., Schmitt L., Höger S., Neese F., Schiemann O.: Time-Resolved EPR and Theoretical Investigations of Metal-Free Triplet Emitters for Organic Light Emitting Diodes

Dzuba S.A., Kardash M.E., Syryamina V.N., Afanasyeva E.F.: Nanoclustering of Spin-Labeled Molecules in Lipid Membranes as Revealed by "Instantaneous Diffusion" Effects in Electron Spin Echo Decay

Fedin M.V., Sheveleva A.M., Veber S.L.: EPR of Metal-Organic Stimuli-Responsive Materials

Oral Talk

Vavilova E., Zaripov R., Vyalikh A., Zschornak M., Köhler T., Nentwich M., Weige T., Gemming S., Brendler E., Meyer D.C.: Defects Structure in Congruent Lithium Tantalite by NMR, ESR, FTIR Spectroscopies and DFT Calculations

Orlinskii S.B., Rodionov A.A., Galukhin A.V., Gracheva I.N., Mamin G.V., M. R. Gafurov: Stable Self-Organized Paramagnetic Complexes in the Asphaltenes' Structures from the W-band EPR and ENDOR

Session: Chemical and Biological Systems

Chair: R. Kaptein

Invited Talks

Likhtenshtein G.: A Combine ESR – Fluorescence Approach for Investigation of Structure, Molecular Dynamics and Mechanism of Electron Transfer in Biological Systems: 50 Years of History

Kokorin A.I., Kolbanev I.V., Sviridova T.V., Sviridov D.V.: Structure and Properties of Mechanically Activated TiO_2/MoO_3, TiO_2/V_2O_5 and TiO_2/MoO_3:V_2O_5 Oxides Studied by EPR and XRD

Enkin N., Liou S.-H., Orlando T., Tkach I., Bennati M.: Fullerene-Nitroxide Derivatives: Polarizers with New Properties for DNP in Liquid State

Tolstoy P.M., Pylaeva S.A., Tupikina E.Yu., Denisov G.S., Elgabarty H., Sebastiani D.: Proton Dynamics in Strong Hydrogen Bonds: Solvent-Induced Distribution of NMR Chemical Shifts

Oral Talks

Polshakov V.I.: NMR Methods to Study Protein-Ligand Interactions

Poster Session

September 28th, 2017

Special Session Devoted to the 110 Anniversary of E. K. Zavoisky

Chair: B. I. Kochelaev

Invited Talks

Tagirov M.S.: E. Zavoisky and Kazan University

Salikhov K.M.: About E. Zavoisky and his Discovery

Plenary Lectures

Bowman M.K., Chen H., Fowler B.R., Maryasov A.G.: The Different Faces of Free Radical Spin Dynamics in Frozen Solution

Tarasov V.F.: Dimer Self-Organization of Rare-Earth Impurity Ions in Synthetic Forsterite

September 29th, 2017

Session: Other Applications of Magnetic Resonance / Perspective of Magnetic Resonance in Science and Spin-Technology

Chair: V. F. Tarasov

Invited Talks

Bunkov Yu.M., Safin T.R., Farhutdinov A.R., Tagirov M.S.: Supermagnonics in YIG Film

Sukhanov A.A., Kandrashkin Yu.E., Voronkova V.K., Tyurin V.S.: Continuous Wave and Time Resolved EPR Studies of Aggregation CuCPP-I

Oral Talks

Eremina R., Konov K., Tarasov V.F., Gavrilova T.P., Shestakov A.V., Zavartsev Yu.D., Zagumennyi A.I., Kutovoi S.A.: ESR Study of Sc_2SiO_5:Nd^{143} Isotopically Pure Crystals

Sakhin V., Kukovitskii E., Garifyanov N., Khasanov R., Talanov Yu., Teitel'baum G.: ESR Study of Intrinsic Magnetic Moments in Topological Insulators

Bizyaev D., Bukharaev A., Nurgazizov N., Khanipov T.: Investigation of Magnetic Anisotropy Field in Stressed Permalloy Microparticles by FMR

Ulanov V.A., Sinicin A.M., Zainullin R.R.: Influence of Free Charge Carriers on EPR Parameters of Gd^{3+} Centers in the $Pb_{1-x}Ag_xS$ and $Pb_{1-x}Cu_xS$ Semiconductors

Esmaeili A., Vakhitov I.R., Nikitin N.P., Yanilkin I.V., Gumarov A.I., Khaliulin B.M., Gabbasov B.F., Aliyev M.N., Yusupov R.V., Tagirov L.R.: FMR Studies of Ultra-Thin Epitaxial PD1-XFEX Films

Poster Session

Akhmetov M.M., Gumarov G.G., Petukhov V.Yu., Konygin G.N., Rybin D.S.: EPR Investigation of Mechanoactivated Copper Gluconate

Andreev N.K.: Cross-Correlation Effects in Spin-lattice Relaxation and Symmetry Restricted Spin Diffusion in Single Crystals of Amino Acids

Anisimova E., Zaripov R., Khairuzhdinov I., Salikhov K., Ruffer T., Vavilova E.: Application of the Multi-Pulse Protocols in Solid State ^1H NMR in Cu(II)-Oxamidato Complex

Bakirov M.M., Galeev R.T., Salikhov K.M.: Routine of Determination of the Spin Exchange Rate Constants from EPR Line Shape Analysis of Nitroxyl Radicals in Liquids

Chirkov V.V., Gumarov G.G., Petukhov V.Yu., Bakirov M.M.: FMR Investigation of Magnetic Anisotropy in Films were Synthesized by Co^+ Implantation into Si

Domracheva N.E., Vorobeva V.E., Gruzdev M.S.: EMR Searching of Quantum Behavior of γ-Fe_2O_3 Nanoparticles Encapsulated in Dendrimeric Matrix

Domracheva N.E., Vorobeva V.E., Ovcharenko V.I., Bogomyakov A.S., Zueva E.M., Gruzdev M.S., Chervonova U.V., Kolker A.M.: Action of Counterion on Spin-Crossover Behavior in Iron(III) Dendrimeric Complexes

Falin M.L., Latypov V.A., Korableva S.L.: EPR of Er^{3+} Ions in $CsCaF_3$ Single Crystals

Falin M.L., Latypov V.A., Leushin A.M., Safiullin G.M.: Structural Models of the Yb^{3+} Ion in the Hexagonal Perovskite $RbMgF_3$ Single Crystal

Frolova E., Ivanova T., Turanova O., Mingalieva L., Zueva E., Petrova M., Ovchinnikov I.: Spin States of [Fe(Salten) Cl] Complexes in Acetonitrile

Gabbasov B.F., Zverev D.G., Nikitin S.I., Gilmutdinov I.F., Batulin R.G., Kiiamov A.G., Yusupov R.V.: EPR Spectroscopy of the Gd^{3+} Ions in the SrY_2O_4 Crystal

Gafiyatullin L., Frolova E., Zueva E., Turanova O., Milordova E., Ovchinikov I.: Studies of [Fe(Salten)L]BPh_4 Complexes Solutions in Acetonitrile

Gainutdinov Kh.L., Andrianov V.V., Iyudin V.S., Yafarova G.G., Sungatullina M.I., Khabibrakhmanov I.I., Ziatdinova N.I., Zefirov T.L.: Dynamics of Nitric Oxide Production in Heart and Liver of Rats During Increasing 30-Days Restriction of Motor Activity and Subsequent Recovery

Goenko I.A., Gumarov G.G., Bakirov M.M., Zaripov R.B., Petukhov V.Yu., Rybin D.S., Konygin G.N.: EPR Investigation of the Conformation of the Irradiated Calcium Gluconate

Gorbovanov A.I., Polulyakh S.N., Berzhansky V.N., Gippius A.A.: Multiple Spin Echoes from ^{57}Fe Nuclei in Ferrimagnetic Yttrium Iron Garnet Films

Goryunov Yu.V., Nateprov A.N.: Topological Interactions of Magnetic Impurities in Topological Semimetal: ESR Data

Gumarov G.G., Lis O.N., Alekseev A.V., Bakirov M.M., Petukhov V.Yu.: Temperature Dependence of Magnetic Anisotropy in Iron Silicide Films Ion-Synthesized in External Magnetic Field

Ibragimova M.I., Khaibullina D.K., Chushnikov A.I., Yatsyk I.V., Petukhov V.Yu., Esin R.G.: The Possibilities of EPR for the Connective Tissue Dysplasia Diagnosis

Imaev A., Sayakhov A., Gorshenin S., Gorshenin M., Sadikov A., Bragin A., Murzakaev V., Gilyazov L., Golubev A., Zverev D., Mumdzhi I., Nikitin S., Ivanov D., Melnikova D., Ivanov A., Gnezdilov O., Archipov R., Aleksandrov A., Skirda V., Fattakhov Ya., Shagalov V., Fakhrutdinov A., Konovalov D., Khabipov R., Anikin A.: Downhole Laboratory for Reservoir Fluid Real-Time Extended NMR, Optical and Dielectric Spectroscopy Analysis and Sampling

Ivanova T., Gilmutdinov I., Turanova O., Mingalieva L., Ovchinnikov I.: Magnetic Interactions in the Chain Structure [Fe(salen)(2-Me-Him)]n

Kupriyanova G.S., Mozzhukhin G.V., Maraşlı A., Rameev B.Z.: ^{1}H NMR Detection of Olive Oil

Kurganskii I., Ivanov M., Fedin M., Prikhod'ko S., Adonin N.: Investigation of Fullerenes C_{60} and PCBM Triplet States Spin Dynamics in Ionic Liquids by Time-Resolved EPR Spectroscopy

Kusova A.M., Sitnitsky A.E., Idiyatullin B.Z., BakirovaD. R., Zuev Yu.F.: Protein Translational Diffusion under Crowding Conditions

Kuzmina D., Sheveleva A., Poryvaev A., Fedin M.: Spin Probe EPR Study of $CO_2/O_2/N_2$ Gas Sorption in ZIF-8

Le N.T., Konstantinova E.A., Iversen B.B.: Spin Centers in Nanocrystalline Titania, Synthesized with Supercritical Flow Reactor Technique

Lisin V.N., Shegeda A.M., Samartsev V.V.: The Coherence of the Exciting Radiation and Amplitude of Oscillations of Echo Intensity vs External dc Magnetic Field

Lvov S., Kukovitsky E.: ESR Study of CuEr Dilute Alloys

Mamadazizov S., Shelyapina M., Kupriyanova G.: DFT Calculations of the ^{14}N NQR Spectra of Some Heterocycles

Mershiev I., Blümich B.: ^{14}N NQR with Frank Sequence Excitation

Mingalieva L.V., Peng Y., Voronkova V.K., Powell A.K.: EPR of $\{Dy^{III}\text{-}Me^{III}_2\text{-}Dy^{III}\}$ Clusters, $Me^{III} = Cr^{III}, Mn^{III}$

Minnekhanov A.A., Vakhrina E.V., Konstantinova E.A.: Investigation of Charge Accumulation Processes in TiO_2-Based Nanoheterostructures

Mozzhukhin G.V., Kupriyanova G.S., Maraşlı A., Rameev B.Z.: Nitrogen ^{14}N NMR Detection of Liquids

Nikitina A.V., Bogachev Yu.V., Kostina A.A., Sabitova V.A., Marchenko Ya.Yu., Nikolaev B.P.: Determination of Aggregation Stability and MRI Contrast Efficiency of Magnetic Nanoparticles by NMR-Relaxometry

Panich A.M., Sergeev N.A.: Towards Determination of Distances between Nanoparticles and Grafted Paramagnetic Ions by NMR Relaxation

Pavlov D., Mamin R.: Multifunctional Properties of Ferromagnetics in Conditions of Photoexcitation

Polulyakh S.N.: A Classical Vector Model for Magnetization of Two-Spin System with Dipole-Dipole Interaction

Ptushenko V.: The First Decade After Zavoisky's Discovery: the EPR Technique in USSR

Raganyan G.V., Zvereva E.A., Nalbandyan V.B., Evstigneeva M.A., Vasiliev A.N.: Field-Induced Long-Range Magnetic Order in A_2MnTeO_6 (A = Na, Li, Ag, Tl)

Salikhov T., Kataev V., Gunter M., Klauss H.-H., Zvereva E., Nalbandyan V., Vavilova E.: NMR Study a Fragmented Haldane Like Spin-Chains

Salikhov T., Zvereva E., Nalbandyan V., Sarkar R., Klauss H.-H., Vavilova E.: Magnetic Properties of Mixed-Valent System $LiMn_2TeO_6$

Samoshkina Yu., Rautskii M., Velikanov D., Volochaev M., Sokolov A., Andreev N., Chichkov V.: Magnetic Resonance Investigation in the Polycrystalline $Pr_{0.8}Sr_{0.2}MnO_3$ Films: Features of the Magnetic States above Curie Temperature

Sapiga A.V., Sergeev N.A.: NMR and Water Molecules Diffusion in Nanochannels of Natrolite

Sergeev N.A., Panich A.M., Goren S.D.: Alignment of Anisotropic Particles by Magnetic Field as Seen by NMR

Shakurov G.S., Vazhenin V.A., Potapov A.P., Isaev V.A., A.V. Lebedev, S.A. Migachev: Wide-Band EPR Spectroscopy of the Black Garnets

Skvortsova P., Shurpik D., Stoikov I., Zuev Y., Khairutdinov B.: The Study of the Receptor Properties of Decasubstituted Pillar[5]arenes to Fluorescein Dye by Methods of the High Resolution NMR Spectroscopy

Sukhanov A.A., Kandrashkin Y.E., Savostina L.I., Voronkova V.K., Tyurin V.S.: Photo-Induced States of Copper Complexes of Coproporphyrin I: from Monomer to Dimer Systems

Sukhanov A.A., Mamedov M.D., Semenov A.Yu., Salikhov K.M.: Distance between Separated Charges in the Ion-Radical Pair $P^{+}_{700}A^{-}_{1}$ of the Photosystem I Reaction Center Complex Incorporated into Trehalose Matrix at Different Dehydration Levels Measured Using Out-of-Phase ESEEM

SukhanovA.A., Peng Y., Voronkova V.K., Powell A.K.: EPR Study of Al_2Er_2 Molecular Cluster

Sukhanov A.A., Voronkova V.K., Tyurin V.S.: Triplet State Delocalization in Zincporphyrin Dimer Probed by TR EPR

Timofeev I., Krumkacheva O., Kuzhelev A., Malygin A., Graifer D., Meschaninova M., Ven'yaminova A., Fedin M., Karpova G., Bagryanskaya E.: EPR Study of Ribosomal Translational Complexes

Tumanov S., Fedin M., Veber S., Tolstikov S., Artiukhova N., Ovcharenko V.: EPR Study of Light-Induced Metastable States in Two-Spin $Cu(hfac)_2L^R$ Compounds

Vafadar M., Rameev B.: Electrically Detected FMR of Permalloy Microstrip via Spin Rectification Effect

Volkov M., Turanova O., Milordova E., Frolova E., Ovchinnikov I., Turanov A.: Spin Properties of [Fe(Salten)Cl] Complex Solutions Studied by NMR and EPR

Wang P., Chen S., Guo M., Peng S., Wang M., Shi F., Rong X., Su J., Du J.: Nanoscale Magnetic Resonance Imaging of Intracellular Proteins

Yatsyk I.V., Eremina R.M., Shirshnev P.S., Vagizov F.G.: Diluted Iron Oxide in K_2O-Al_2O_3-B_2O_3 Studied Method EPR

Yurtaeva S., Efimov V.: Temperature Dependence of Resonance Field of EMR Signals in Biological Tissues

Yurtaeva S., Volkov M, Yafarova G., Silantieva D., Yamalitdinova E.: ^{31}P NMR Spectrum of Rat Blood in Conditions of Spinal Cord Injury

Zaripov R., Vavilova E., Khairuzhdinov I., Anisimova E., Salikhov T., Voronkova V., Salikhov K., Abdulmalic M., Meva F., Weheabby S., Rüffer T., Büchner B., Kataev V.: Peculiarities of the Application of a Multi-Pulse Sequence for Spin Coherence Control

Zaripov R., Vavilova E., Khairuzhdinov I., Salikhov K., Voronkova V., Abdulmalic M.A., Meva F.E., Weheabby S., Rüffer T., Büchner B., Kataev V.: Determination of HFI Constants of Cu Oxamato-Complex by ENDOR and ED NMR Techniques

Ziatdinov A. M.: Topological Zero Modes in Few-Layer Nanographenes: EPR, CESR and Magnetic Susceptibility Studies

Итоговая конференция КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН

Стендовая сессия

4–5 декабря 2017 года

Лисин В.Н., Шегеда А.М., Самарцев В.В.: Когерентность возбуждающей радиации и зависимость амплитуды осцилляций интенсивности фотонного эха от внешнего постоянного магнитного поля

Шахмуратов Р.Н.: Преобразование частотно-модулированного излучения в последовательность коротких импульсов с помощью метода резонансной фильтрации через ансамбль щелочных атомов

Шухин А.А., Калачёв А.А. (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН), Keloth J., Hakuta K. (Center of photonic innovations, University of Electro-communications, Tokyo, Japan): Интегральный однофотонный источник на основе оптических нановолокнон

Шкаликов А.В., Акатьев Д.О., Латыпов И.З., Калачёв А.А.: Узкополосный однофотонный источник на основе СПР света в PPLN для квантовой памяти

Турайханов Д.А., Шкаликов А.В., Латыпов И.З., Калачёв А.А.: Генерация однофотонных состояний с орбитальным угловым моментом

Акатьев Д.О. (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН), Болдырев К.Н., Попова М.Н. (ИСАН, Москва), Калачёв А.А. (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН): Перспективы наблюдения спонтанного параметрического рассеяния света при криогенных температурах

Самарцев В.В., Митрофанова Т.Г.: Коррелированные наведённые электронные и спиновые "решетки" и их применение в фемтосекундной когерентной спектроскопии и спинтронике

Самарцев В.В., Митрофанова Т.Г.: Коррелированные сигналы кластерной суперфлуоресценции при двух- и трёхквантовом фемтосекундном возбуждении наноструктур CdSe/CdS скрещёнными фемтосекундными лазерными пучками

Усеинов А.Н. (National Tsing Hua University, Hsinchu, Taiwan; КФУ, Казань), Гурылёв (National Tsing Hua University, Hsinchu, Taiwan), Усеинов Н.Х. (КФУ), Hsiu-Hau Lin (National Tsing Hua University, Hsinchu, Taiwan), Тагиров Л.Р. (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН): Спин-зависящий транспорт в наноразмерных металлических структурах

Лапаев Д.В., Никифоров В.Г., Лобков В.С. (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН), Князев А.А. (КНИТУ-КХТИ), Галяметдинов Ю.Г. (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН): Термочувствительный элемент на основе застеклованной плёнки мезогенного бета-дикетонатного комплекса Eu(III) для люминесцентных термометров

Жарков Д.К., Шмелёв А.Г., Леонтьев А.В., Никифоров В.Г., Лобков В.С.: Фемтосекундная спектроскопия молекулярных либраций в бензонитриле

Нуждин В.И., Коновалов Д.А., Валеев В.Ф., Степанов А.Л.: Разработка и изготовление автоматизирован-

ного комплекса для определения фотоэлектрических характеристик солнечных элементов

Коновалов Д.А., Нуждин В.И., Валеев В.Ф., Степанов А.Л.: Создание установки для измерения вольтамперных характеристик полупроводников

Баталов Р.И., Нужин В.И., Валеев В.Ф., Бизяев Д.А., Нургазизов Н.И., Бухараев А.А., Шустов В.А., Воробьёв В.В. (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН), Осин Ю.Н. (КФУ), Ивлев Г.Д. (БГУ, Минск), Степанов А.Л. (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН): Влияние импульсного лазерного отжига на структурные, оптические и фотоэлектрические свойства композитных слоёв Si и GeSi с наночастицами Ag, полученных высокодозной ионной имплантацией

Степанов А.Л., Нуждин В.И., Валеев В.Ф., Галяутдинов М.Ф., Курбатова Н.В., Воробьёв В.В., Рогов А.М. (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН), Осин Ю.Н. (КФУ): Имплантация алмаза ионами серебра и создание дифракционного элемента

Рогов А.М., Нуждин В.И., Валеев В.Ф., Воробьёв В.В. (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН), Осин Ю.Н. (КФУ), Степанов А.Л. (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН): Формирование пористого германия с наночастиами серебра методом ионной имплантации

Базаров В.В., Нуждин В.И., Валеев В.В., Степанов А.Л.: Наблюдение методом спектроэллипсометрии поверхности кремния, облученного низкими дозами ионов серебра

Воробьёв В.В., Рогов А.М., Нуждин В.И., Валеев В.Ф., Рогов А.М. (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН), Осин Ю.Н. (КФУ), Степанов А.Л. (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН): Микроскопия поверхности кремния, имплантированного ионами серебра

Моисеев С.А. (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН), Перминов Н.С. (КНИТУ-КАИ): К реализации суперэффективной квантовой памяти

Герасимов К.И., Моисеев С.А., Зарипов Р.Б.: Протокол микроволновой памяти на частотной решеткой, контролируемый импульсами градиента магнитного поля

Фаррахов Б.Ф., Фаттахов Я.В., Галяутдинов М.Ф., Степанов А.Л.: Дилатометрия полиметилметакрилата при низких температурах

Фаттахов Я.В., Коновалов Д.А., Фахрутдинов А.Р., Шагалов В.А., Хабипов Р.Ш., Аникин А.Н.: Опытный образец скважинного прибора для измерения диэлектрических характеристик пластового флюида

Сессия 2

Зарипов Р.Б., Вавилова Е.Л., Хайруждинов И.Т. , Салихов К.М., Воронкова В.К., Катаев В.Е. (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН), Abdulmalic M.A. (IFW Dresden, Germany), Weheabby S., Rüffer T. (TU Chemnitz, Germany), Meva F.E. (University of Douala, Cameroon), Büchner B. (TU Dresden, IFW Dresden, Germany): Определение констант СТВ в комплексах оксамата меди методами ENDOR и ED NMR

Мингалиева Л.В., Воронкова В.К., Галеев Р.Т., Суханов А.А. (КФТИ ФИЦ КазН ЦРАН), Peng Y., Powell A.K. (Institute of Inorganic Chemistry, Karlsruhe Institute of Technology, Germany): Особенности ЭПР кластеров с димерами Cr(III)

Зарипов Р.Б., Хайруждинов И.Т., Вавилова Е.Л., Воронкова В.К., Салихов К.М., Катаев В.Е.: Модификация протокола Карра-Парселла-Мейбума-Гилла для измерения времен фазовой релаксации

Зарипов Р.Б.: Изучение обогащённых C^{13} нитроксильных радикалов с помощью импульсного ДЭЯР в W-диапазоне

Суханов А.А., Кандрашкин Ю.Е., Воронкова В.К., Тюрин В.С.: Поляризация электронных спинов фотовозбужденного медного комплекса копропорфирина. От мономера к димеру

Суханов А.А., Воронкова В.К. (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН), Kejing Xu, Jianzhang Zhao (Даляньский технологический университет, Китай): Исследование триады BODIPY-TEMPO методом времяразрешенного ЭПР

Галеев Р.Т.: Влияние туннелирования намагниченности и релаксации в окрестности антипересечения уровней энергии на динамическую восприимчивость

Салихов К.М.: Проявление коллективных мод спиновой динамики, обусловленных случайными бимолекулярными столкновениями парамагнитных частиц в разбавленных растворах

Волков М.Ю., Воронкова В.К., Зарипов Р.Б., Конов К.Б., Салихов К.М., Суханов А.А.: Исследование молекулярного механизма стабилизирующего и криопротекторного влияния трегалозы на функциональные свойства белков и белковых комплексов фотосинтетических реакционных центров. Исследование методами ЭПР

Волков М., Туранова О., Туранов А.: Изучение магнитных свойств раствора комплекса Fe(III) с помощью ЯМР метода “стационарной коаксиальной ампулы”

Gainutdinov Kh.L., Andrianov V.V., Iyudin V.S., Yafarova G.G. (ZPTI – Subdivision of FIC Kazan SC of RAS), Sungatullina M.I., Khabibrakhmanov I.I., Ziatdinova N.I., Zefirov T.L. (KFU): Dynamics of nitric oxide production in heart and liver of rats during increasing 30-days hypokinesia and subsequent recovery

Домрачева Н.Е., Воробьёва В.Е. (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН), Овчаренко В.И., Богомяков А.С. (институт МТЦ СО РАН, Новосибирск), Зуева Е.М. (КНИТУ-КХТИ), Груздев М.С., Червонова У.В., Колкер А.М. (ИХР РАН): Влияние анионов на спин-кроссовер свойства, упаковку и магнитное поведение дендримерных комплексов Fe(III) второй генерации

Домрачева Н.Е., Воробьёва В.Е. (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН), Груздев М.С. (ИХР РАН, Иваново), Швачко Ю.Н., Стариченко Д.В. (ИФМ УрО РАН, Екатеринбург): ЭПР детектирование возможного квантового поведения наночастиц g-Fe_2O_3 в дендримерном нанокомпозите

Иванова Т.А., Туранова О.А. (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН), Гильмутдинов И.Ф. (КФУ), Мингалиева Л.В., Овчинников И.В. (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН): Особенности

магнитных взаимодействий в структуре [Fe(salen)(2-Me-Him)]n

Фролова Е.Н., Иванова Т.А., Туранова О.А., Мингалиева Л.В. (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН), Зуева Е.М. (ИОФХ), Петрова М. (КНИТУ-КХТИ), Овчинников И.В. (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН): Спиновые состояния комплекса [Fe(Salten)Cl] в растворе ацетонитрила

Юртаева С.В., Яфарова Г.Г., Яцык И.В., Волков М.Ю.: Информационные возможности ЭПР и ЯМР спектроскопии при изучении экспериментальной травмы спинного мозга

Гафиятуллин Л.Г., Фролова Е.Н. (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН), Зуева Е.М. (ИОФХ), Туранова О.А., Милордова Е.О., Овчинников И.В. (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН): Исследования растворов комплексов [Fe(Salten)L] BPh_4 в ацетонитриле

Туранов А.Н.: Получение гребенки Дирака в двух импульсной последовательности ЯМР с градиентом магнитного поля

Сессия 3

Ханипов Т.Ф., Бизяев Д.А., Бухараев А.А., Чирков В.В., Чукланов А.П., Нургазизов Н.И.: Исследование поведения оси лёгкого намагничивания Ру частицы при механическом напряжении методами MOKE и MFM

Морозова А.С., Зиганшина С.А., Бухараев А.А. (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН), Зиганшин М.А. (КФУ): Самоорганизация трипептида L-глицил- L-глицил -L-глицин в плёнках до и после взаимодействия с парами органических веществ по данным АСМ

Бизяев Д.А., Бухараев А.А., Чукланов А.П., Ханипов Т.Ф., Нургазизов Н.И., Русских И.В., Садчиков Ю.М.: Трансформация доменной структуры микрочастиц пермаллоя, индуцированных механическими напряжениями

Бедин С.А. (ИК РАН, МПГУ, Москва), Бизяев Д.А., Бухараев А.А., Загорский Д.Л. (ИК РАН, РГУ нефти и газа, Москва): Магнитно-силовая микроскопия нанопроволок железа в полимерной матрице

Зиганшина С.А. (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН), Зиганшин М.А., Сафиуллина А.С., Герасимов А.В., Климовицкий Е.Е., Хаяров Х.Р., Горбачук В.В. (КФУ): Визуализация химической реакции циклизации дипептида в твёрдом состоянии с помощью атомно-силового микроскопа

Лядов Н.М., Хайбуллин Р.И., Шустов В.А., Вагизов Ф.Г, Гумаров А.И., Файзрахманов И.А.: Влияние режимов осаждения на структуру и магнитные свойства плёнок железа

Мухаметшин А.В., Гумаров А.И., Янилкин И.В., Вахитов И.Р. (КФУ), Нуждин В.И. (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН), Вагизов Ф.Г., Лопатин О.Н. (КФУ), Хайбуллин Р.И., Тагиров Л.Р. (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН): Имплантация ионов железа в кристаллическую структуру природного горного хрусталя

Хайбуллин Р.И., Валеев В.Ф. (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН), Дулов Е.Н., Латыпова Р.И. (КФУ): Магнитные свойства тонких плёнок титаната стронция, имплантированного железом

Базаров В.В., Нуждин В.И., Валеев В.Ф., Лядов Н.М.: Анализ поверхности кремния, имплантированного лёгкими ионами гелия и кислорода, методом спектральной эллипсометрии.

Нуждин В.И., Валеев В.Ф., Коновалов Д.А.: Стационарное устройство для подачи жидкого азота в систему охлаждения вакуумной камеры ионного ускорителя ИЛУ-3

Баталов Р.И., Баязитов Р.М., Новиков Г.А., Файзрахманов И.А., Лядов Н.М., Шустов В.А. (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН), Ивлев Г.Д. (БГУ, Минск): Воздействие импульсных лазерных и ионных пучков на вакуумно-осажденные слои Ge:Sb на подложках Ge. Расчёты и эксперимент

Баталов Р.И., Баязитов Р.М., Файзрахманов И.А., Лядов Н.М. (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН), Володин В.А., Кривякин Г.К. (ИФП СО РАН, Новосибирск), Ивлев Г.Д. (БГУ, Минск): Структура и оптические свойства наночастиц Ge, полученных на поверхности оксидных подложек импульсным лазерным воздействием

Баталов Р.И., Баязитов Р.М., Файзрахманов И.А., Лядов Н.М., Хайбуллин Р.И., Базаров В.В. (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН), Гумаров А.И. (КФУ): Модифицирование поверхностных слоёв Si низкоэнергетичным облучением ионами Xe^+

Алексеев А.В., Гумаров Г.Г. (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН), Лис О.Н. (ИОФ, Москва), Петухов В.Ю., Бакиров М.М. (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН): Температурная зависимость магнитной анизотропии в плёнках силицида железа, ионно- синтезированных во внешнем магнитном поле

Чирков В.В., Гумаров Г.Г., Петухов В.Ю., Бакиров М.М.: ФМР исследование магнитной анизотропии в плёнках, синтезированных имплантацией Co^+ в Si

Ахметов М.М., Гумаров Г.Г., Петухов В.Ю. (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН), Рыбин Д.С., Коныгин Г.Н. (ФТИ УрО РАН, Ижевск): ЭПР исследование механоактивированного глюконата меди

Гоенко И.А., Гумаров Г.Г., Петухов В.Ю., Бакиров М.М., Зарипов Р.Б. (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН), Коныгин Г.Н., Рыбин Д.С. (ФТИ УрО РАН, Ижевск): ЭПР исследование конформации облученного глюконата кальция

Чушников А.И., Ибрагимова М.И., Петухов В.Ю., Яцык И.В. (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН), Есин Р.Г. (КФУ): Возможности ЭПР для диагностики дисплазии соединительной ткани

Сессия 4

Фалин М.Л., Латыпов В.А. (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН), Леушин А.М. (КФУ), Сафиуллин Г.М. (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН): Структурные модели ионов Yb^{3+} в монокристалле гексагонального перовскита $RbMgF_3$

Фалин М.Л., Латыпов В.А. (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН), Кораблёва С.Л. (КФУ): ЭПР иона Er^{3+} в мономонокристалле $CsCaF_3$

Важенин В.А., Потапов А.П. (УрФУ, Екатеринбург), Шакуров Г.С. (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН), Фокин А.В., Артёмов М.Ю. (УрФУ, Екатеринбург), Козловский В.И. (ФИАН, НИЯУ МИФИ, Москва), Коростелин Ю.В. (ФИАН, Москва), Пыталев Д.С. (ИСАН, Москва): Парамагнитные дефекты в кристаллах ZnSe, активированных ионами железа

Гаврилова Т.П., Ерёмина Р.М., Яцык И.В., Лядов Н.М.: Эффект магнитной близости в композитах на основе $CaCu_3Ti_4O_{12}$

Шестаков А.В., Фазлижанов И.И., Яцык И.В., Ерёмина Р.М.: Изучение магнитных свойств стекол $25Al_2O_3$-$25K_2O$-$50B_2O_3$ (мол%) легированных оксидом Fe_2O_3

Шестаков А.В., Фазлижанов И.И., Яцык И.В., Ерёмина Р.М.: Осцилляции в спектре магнитного резонанса $Hg_{1-x}Mn_xTe$

Яцык И.В., Ерёмина Р.М, Гаврилова Т.П.: Фазовое расслоение в керамике $Yb_{0.82}Sr_{0.18}MnO_3$

Тарасов В.Ф., Суханов А.А., (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН) Дудникова В.Б., Жариков Е.В., Лис Д.А., Субботин К.А. (ИОФ, Москва): Димерная самоорганизация примесных ионов иттербия в монокристаллах синтетического форстерита

Яковлева М.Ф., Вавилова Е.Л. (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН), Grafe H.-J. (IFW Dresden, Germany), Катаев В.Е. (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН), Alfonsov A. (TU Dresden, Germany), Nojiri H., Sturza M.I., Wurmehl S. (IFW Dresden, Germany), Büchner B. (TU Dresden, IFW Dresden, Germany): Исследование экзотических спиновых фаз в одномерном магнетике $LiCuSbO_4$ методом ЯМР в сильных магнитных полях

Вавилова Е. Л., Яковлева М.Ф. (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН), Zimmermann S. (IFW Dresden, TU Dresden, Germany), Zeisner J., Alfonsov A. (TU Dresden, Germany), Grafe H.-J. (IFW Dresden, Germany), Valldor M., Büchner B. (TU Dresden, IFW Dresden, Germany), Катаев В.Е. (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН): ЯМР спектроскопия спин-фрустрированного магнетика $YBaCo_3AlO_7$

Салихов Т.М., Вавилова Е.Л. (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН), Lipps F., Arkenbout A.H., Polyakov A., Günther M., Klauss H.-H., Büchner B. (TU Dresden, IFW Dresden, Germany), Palstra T.M. (IFW Dresden, Germany), Катаев В.Е. (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН): Магнитные свойства соединения $NiC_{l3}C_6H_5CH_2CH_2NH_3$ с цепочками спинов = 1

Мамин Р.Ф., Шапошникова Т.С. (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН), Кабанов В.В. (Complex Matter Department, Jozef Stefan Institute, Ljubljana): Феноменологическая модель фазового разделения и фазового перехода второго рода для двумерной системы, фрустрированной кулоновским взаимодействием

Павлов Д.П., Пиянзина И.И., Мухортов В.М. (ЮНЦ РАН, Ростов-на-Дону), Балбашов А.М. (МЭИ, Москва), Таюрский Д.А. (КФУ), Гарифуллин И.А., Мамин Р.Ф. (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН): Двумерный электронный газ на границе сегнетоэлектрика и антиферромагнетика

Камашев А.А., Валидов А.А., Гарифуллин И.А., Лексин П.В. (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН), Фоминов Я.В. (ИТФ РАН), Шуманн Й., Катаев В. (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН), Бюхнер Б. (IFW Dresden): Эффект сверхпроводящего спинового клапана в гетероструктуре, содержащей сплав Гейслера в качестве ферромагнитного слоя

Сахин В.О., Куковицкий Е.Ф., Гарифьянов Н.Н., Хасанов Р.И., Таланов Ю.И., Тейтельбаум Г.Б.: Собственные магнитные моменты в топологических изоляторах

Гимазов И.И., Сахин В.О., Таланов Ю.И. (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН), Adachi T. (Sophia University, Japan), Noji T., Koike Y. (Tohoku University, Sendai, Japan): Исследование влияния сверхпроводящих флуктуаций на состояние $Bi_2Sr_2Ca_{1-x}Y_xCu_2O_8$ вблизи критической температуры

Горюнов Ю.В. (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН), Натепров А.Н. (ИПФ МАН): Топологическое взаимодействие магнитных примесей в 3D топологическом полуметалле

Хантимеров С.М., Гарипов Р.Р., Тогулев П.Н., Фатыхов Р.Р., Сулейманов Н.М.: Электрофизические свойства композиционных материалов с использованием модифицированных углеродных нанотрубок в качестве легирующей добавки

Садчиков Ю.В., Файзуллин А.М. (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН), Хамзин А.Г., Зигангиров В.Р. (КНИТУ-КАИ): Задачи прочности при форсировании дизельного двигателя

Садчиков Ю.В., Ашихмин А.Н., Сергеев А.С., Русских И.В.: Численное решение задачи повышения весовой эффективности конструкции из композиционных материалов

Устная сессия
Секция физическая

13 февраля 2018 года

Заседание 1. Председатель: К. М. Салихов, д.ф.-м.н., акад. РАН

Лисин В.Н., Шегеда А.М., Самарцев В.В.: Когерентность возбуждающей радиации и зависимость амплитуды осцилляций интенсивности фотонного эха от внешнего постоянного магнитного поля

Шахмуратов Р.Н.: Преобразование частотно-модулированного излучения в последовательность коротких импульсов с помощью метода резонансной фильтрации через ансамбль щелочных атомов

Шкаликов А.В., Акатьев Д.О., Латыпов И.З., Калачёв А.А.: Узкополосный однофотонный источник на основе СПР в резонаторе для квантовой памяти

Тагиров Л.Р. (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН), Усеинов А.Н. (National Tsing Hua University, Hsinchu, Taiwan, КФУ, Казань), Гурылев В. (National Tsing Hua University,

Hsinchu, Taiwan), Усеинов Н.Х. (КФУ), Hsiu-Hau Lin (National Tsing Hua University, Hsinchu, Taiwan). Спин-зависящий транспорт в наноразмерных металлических структурах

Заседание 2. Председатель: А. А. Бухараев, д.ф.м.н., проф.

Баталов Р.И., Нужин В.И., Валеев В.Ф., Бизяев Д.А., Нургазизов Н.И., Бухараев А.А., Шустов В.А., Воробьёв В.В., Осин Ю.Н., Степанов А.Л. (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН), Ивлев Г.Д. (БГУ, Минск): Влияние импульсного лазерного отжига на структурные, оптические и фотоэлектрические свойства композитных слоёв Si и GeSi с наночастицами Ag, полученных высокодозной ионной имплантацией

Степанов А.Л., Нуждин В.И., Валеев В.Ф., Галяутдинов М.Ф., Курбатова Н.В., Воробьёв В.В., Рогов А.М., Осин Ю.Н.: Имплантация алмаза ионами серебра и создание дифракционного элемента

Рогов А.М., Нуждин В.И., Валеев В.Ф., Воробьёв В.В., Осин Ю.Н., Степанов А.Л.: Формирование пористого германия с наночастицами серебра методом ионной имплантации

Воробьёв В.В., Рогов А.М., Нуждин В.И., Валеев В.Ф., Рогов А.М., Осин Ю.Н., Степанов А.Л.: Микроскопия поверхности кремния, имплантированного ионами серебра

Павлов Д.П., Пиянзина И.И., Мухортов В.М. (ЮНЦ РАН, Ростов-на-Дону), Балбашов А.М. (МЭИ, Москва), Таюрский Д.А. (КФУ), Гарифуллин И.А., Мамин Р.Ф. (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН): Двумерный электронный газ на границе сегнетоэлектрика и антиферромагнетика

Заседание 3. Председатель: А. А. Калачёв, д.ф.-м.н., проф. РАН

Зарипов Р.Б., Хайруждинов И.Т., Вавилова Е.Л., Воронкова В.К., Салихов К.М., Катаев В.Е.: Модификация протокола Карра-Парселла-Мейбума-Гилла для измерения времен фазовой релаксации

Суханов А.А., Кандрашкин Ю.Е., Воронкова В.К. (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН), Тюрин В.С. (ИФХЭ РАН): Поляризация электронных спинов фотовозбужденного медного комплекса копропорфирина. От мономера к димеру

Салихов К.М., Суханов А.А.: Исследование молекулярного механизма стабилизирующего и криопротекторного влияния трегалозы на функциональные свойства белков и белковых комплексов фотосинтетических реакционных центров. Исследование методами ЭПР

Тарасов В.Ф., Суханов А.А. (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН), Дудникова В.Б. (МГУ), Жариков Е.В., Лис Д.А., Субботин К.А. (ИОФ РАН): Димерная самоорганизация примесных ионов иттербия в монокристаллах синтетического форстерита

Заседание 4. Председатель: Н. М. Сулейманов, д.ф.-м.н., проф.

Лапаев Д.В., Никифоров В.Г., Лобков В.С. (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН), Князев А.А. (КНИТУ-КХТИ), Галяметдинов Ю.Г. (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН): Термочувствительный элемент на основе застеклованной плёнки мезогенного бета-дикетонатного комплекса Eu(III) для люминесцентных термометров

Зиганшина С.А. (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН), Зиганшин М.А., Сафиуллина А.С., Герасимов А.В., Климовицкий Е.Е., Хаяров Х.Р., Горбачук В.В. (КФУ): Визуализация химической реакции циклизации дипептида в твёрдом состоянии с помощью атомно-силового микроскопа

Баталов Р.И., Баязитов Р.М., Новиков Г.А., Файзрахманов И.А., Лядов Н.М., Шустов В.А. (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН), Ивлев Г.Д. (БГУ, Минск): Воздействие импульсных лазерных и ионных пучков на вакуумно-осажденные слои Ge:Sb на подложках Ge. Расчёты и эксперимент

Горюнов Ю.В. (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН), Натепров А.Н. (ИПФ МАН): Топологическое взаимодействие магнитных примесей в 3D топологическом полуметалле.

Конференция молодых учёных "Молодёжь и инновации Татарстана", 26–27 октября 2017 года

Секция "Информационные технологии"

Щербаков И.А. (КНИТУ-КХТИ): Разработка дистанционных учебных курсов в системе MOODLE с использованием технологий геймификации

Секция "Медицина будущего"

Бакиров М.М. (КФТИ КазНЦ РАН): К алгоритму определения константы скорости спинового обмена из анализа формы спектра эпр раствора парамагнитных зодов

Секция "Современные материалы и технологии их создания"

Гарипов Р.Р. (КФТИ КазНЦ РАН): Разработка электропроводящего композиционного материала на основе полимера и углеродных нанотрубок

Идрисов А.Р. (КНИТУ-КХТИ): Бесполимерная высокотемпературная технологическая жидкость для грп на основе цвиттерионных вязкоупругих ПАВ

Львов Д.С. (ИФТТ РАН, Черноголовка): Разработка методики синтеза субмикронных монокристаллических пластин на основе Bi, SE, TE методом физического осаждения

Морозов О.И. (УлГТУ, Ульяновск): Разработка и исследование технологии повышения стойкости рабочих поверхностей деталей штампов и пресс-форм из

теплостойких сталей с использованием методов поверхностной модификации

Рогов А.М. (КФУ): Создание SERS-активных подложек методом ионной имплантации германия ионами серебра с последующим импульсным отжигом

Салихов Т.М. (КФТИ КазНЦ РАН): Магнитные свойства смешанно-валентного соединения $LiMn_2TeO_6$

Усманова Ю.Х. (КНИТУ-КХТИ): Разработка гомогенных каталитических систем на основе соединений кальция для процессов окисления алкилароматических углеводородов

Фатыхов Р.Р. (КФТИ КазНЦ РАН): Разработка анодного материала для литий-ионных аккумуляторов с улучшенными удельными характеристиками

Anisimova E.E. (КФТИ КазНЦ РАН): Peculiarities of the multi-pulse protocols in solid state ^{1}H NMR in Cu(II)-oxamidato complex

Воробьёв В.В. (КФТИ КазНЦ РАН): Эффект усиления комбинационного рассеяния света на ионносинтезированных наночастицах серебра

Камашев А.А. (КФТИ КазНЦ РАН): Возможность генерации спин-поляризованного тока в сверхпроводящем слое

Секция “Новые приборы и аппаратные комплексы”

Ахмедов Н.Р. (АГНИ, Альметьевск): Разработка скважинного (забойного) трактора для бурения горизонтального участка скважины

Хундиряков В.Е. (КФУ): Разработка радиочастотного приёмного датчика повышенной чувствительности для специализированного томографа

Секция “Биотехнологии”

Сафиуллина А.Р. (ГКАВМ): Разработка молекулярно-генетического метода тестирования крупного рогатого скота по ДНК-маркерам иммунной системы

Вафина А.И. (КНИТУ-КХТИ): Перспектива применения новых молочнокислых изолятов в технологии нежирных йогуртов

Участие сотрудников в конференциях

Международные конференции

XXI Международный симпозиум “Нанофизика и наноэлектроника”, 13–16 марта 2017, Нижний Новгород, Россия

Бухараев А.А.: Использование магнитоупругого эффекта в наноструктурах для хранения и обработки информации (приглашён.)

Бухараев А.А., Бизяев Д.А., Зиганшина С.А., Нургазизов Н.И., Ханипов Т.Ф., Чукланов А.П., Чирков В.В.: Исследование магнитоупругих свойств ферромагнитных микрочастиц методами магнитополяриметрии, МСМ и ФМР (стенд.)

Сахин В.О., Куковицкий Е.Ф., Гарифьянов Н.Н., Таланов Ю.И., Тейтельбаум Г.Б.: Магниторезонансное исследование Bi_2Te_3, допированного марганцем (стенд.)

Таланов Ю.И., Гимазов И.И., Сахин В.О., Adachi T., Noji T., Koike Y.: Поглощение микроволн кристаллами ВТСП в псевдощелевом состоянии (приглашён.)

DPG Tagung, March 19–24, 2017, Dresden, Germany

Iakovleva M., Vavilova E., Grafe H.-J., Kaustuv M., Vogl M., Dey T., Wurmehl S., Büchner B., Kataev V.: NMR investigation of Ir-based double perovskites (poster)

Nishimoto S., Grafe H.-J., Iakovleva M., Vavilova E., Alfonsov A., Sturza M.-I., Rosner H., Richter J., Rössler U., Drechsler S.-L., Kataev V., Büchner B.: Unconventional nematic state in the frustrated and anisotropic spin-chain cuprate $LiCuSbO_4$ (oral)

British-Russian Workshop on Quantum Technologies, March 20–23, 2017, Moscow, Russia

Kalachev A.A.: Towards off-resonant Raman quantum memory in rare-erath-ion-doped crystals (invited)

Latypov I.Z.: Developing narrowband SPDC-based single-photon sources (oral)

Chinese-Russian Workshop on Laser Physics, Fundamental and Applied Photonics, April 21–26, Nanjing, China

Kalachev A.A.: Developing Optical Quantum Memory in Isotopically Pure Rare-Earth-Doped Crystals (invited)

14th International Youth School-Conference “SPINUS 2017 – Magnetic Resonance and its Applications”, April 23–29, 2017, St. Petersburg, Russia

Mamatova A.A., Savostina L.I.: Accounting for the effects of conformational structure of the spin labels on the parameters of the EPR spectra by DFT method (poster)

Compound Semiconductor Week-2017 (CSW-2017), May 14–18, 2017, Berlin, Germany

Stepanov A.L., Nuzhdin V.I., Valeev V.F., Vorobev V.V., Osin Y.N.: Porous silicon layer with ion-implanted silver nanoparticles (poster)

Международный симпозиум "Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS) 2017", May 22–25, 2017, St. Petersburg, Russia

Ashurov M.S., Stepanov A.L., Klimonsky S.O.: Two-level diffraction structures prepared by vertical deposition of SiO_2 microspheres (oral)

Akbari M., Kalachev A.: Optimizing third-order spontaneous parametric down-conversion in microresonators (oral)

Nanomeeting-2017, May 30–June 2, 2017, Minsk, Belarus

Stepanov A.L., Nuzhdin V.I., Valeev V.F., Kurbatova N.V., Galyautdinov M.F.: Nanostructuring of diamond and optical diffraction grid formation by boron ion implantation (oral)

International Conference "Quantum in Complex Matter: Superconductivity, Magnetism & Ferroelectricity" (Superstripes 2017), June 4–10, 2017, Ischia, Italy

Teitel'baum G.: On the phenomenological two-component physics for cuprates (invited)

Всероссийская (с международным участием) конференция "Физика низкотемпературной плазмы" (ФНТП-2017), 5–9 июня 2017, Казань, Россия

Кашапов Р.Н.: Получение металлических порошков в плазменно-электролитном разряде (устн.)

Кашапов Л.Н., Кашапов Р.Н.: Исследование роста паровоздушной оболочки газового разряда с жидким электролитическим катодом раствора гидрооксида натрия (устн.)

XXVII Международная конференция "Радиационная физика твёрдого тела", 10–15 июня 2017, Севастополь, Россия

Баязитов Р.М., Баталов Р.И., Новиков Г.А., Файзрахманов И.А., Шустов В.А., Воробьёв В.В., Осин Ю.Н., Ивлев Г.Д.: Воздействие мощных импульсных ионных и лазерных пучков на гетероструктуру n+-Ge:Sb/p-Ge (устн.)

Чирков В.В., Гумаров Г.Г., Коновалов Д.А., Петухов В.Ю.: Регистрация эффекта Керра с использованием программного синхронного детектирования (устн.)

International Workshop on Phase Transitions and Inhomogeneous States in Oxides, June 25–30, 2017, Kazan, Russia

Gavrilova T., Eremina R., Gilmudtinov I., Lyadov N., Kabirov Yu., Gavrilyachenko V., Belokobilsky M.: Magnetic properties of heterogeneous materials based on manganites (poster)

Kabanov V.V., Mamin R.F.: Giant dielectric permittivity and magneto-capacitance effects in low doped manganites (invited)

Mikailzade F.A., Maksutoğlu M., Mammadov T.G., Khalitov N.I., Valeev V.F., Khaibullin R.I., Tagirov L.R.: Phase transitions in nanocomposite multiferroics derived using ion implantation technique (invited)

Pavlov D.P., Mamin R.F.: Multifunctional properties of ferroics and multiferroics in conditions of photoexcitation (poster)

Piyanzina I., Lysogorskiy Y., Tayurskii D., Eyert V., Kopp T., Mamin R.: Electronic properties of a 2D electron liquid at the n-type interface between complex oxides (oral)

Sakhin V., Kukovitskii E., Garifyanov N., Talanov Yu., Teitel'baum G.: EPR of the Local Magnetic Moments in the undoped Bi_2Te_2Se (oral)

25 International Symposium on Nanostructures, 26–30 June 2017, Saint Petersburg, Russia

Shestakov A.V., Fazlizhanov I.I., Yatsyk I.V., Ibragimova M.I., Shustov V.A., Eremina R.M.: The oscillations of magnetization and derivative of microwave absorption in $Hg_{0.76}Cd_{0.24}Te$ implanted with Ag^+ ions in X and Q-bands (poster)

Moscow International Symposium on Magnetism (MISM), July 1–5, 2017, Moscow, Russia

Alekseev A.V., Gumarov G.G., Petukhov V.Yu., Bakirov M.M.: Inhomogeneous broadening of the FMR line of ferromagnetic silicide films made by ion-beam synthesis in external magnetic field (poster)

Bizyaev D.A., Bukharaev A.A., Chuklanov A.P., Khanipov T.F., Nurgazizov N.I., Russkikh I.V., Sadchikov Yu.V.: Transformation of domain structure of permalloy microparticles under mechanical tension (poster)

Bukharaev A.A., Bizyaev D.A., Chirkov V.V., Chuklanov A.P., Khanipov T.F., Nurgazizov N.I., Ziganshina S.A.: Investigation the magnetoelastic effect of permalloy structures on PVDF substrate induced by heating (poster)

Bykov E.O., Kurbakov A.I., Malyshev A.L., Eremina R.M.: Phase separation of manganites-multiferroics $Yb_{1-x}Sr_xMnO_3$ (poster)

Domracheva N.E., Vorobeva V.E, Pyataev A.V., Gruzdev M.S.: Novel magnetic nanostructures: iron-containing dendrimers with thermo- and photocontrolled magnetic properties (oral)

Gavrilova T., Deeva J., Yatsyk I., Yagfarova A., Gilmutdinov I., Lyadov N., Chupakhina T., Eremina R.: Magnetic properties of nanostructures $(SrFe_{12}O_{19})_x(CaCu_3Ti_4O_{12})_{1-x}$ composites (poster)

Gavrilova T.P., Eremina R.M., Yatsyk I.V., Gilmutdinov I.F., Kiiamov A.G., Lyadov N.M., Kabirov Yu.V.: Magnetic proximity effect in $(La_{0.7}Sr_{0.3}MnO_3)_x(CaCu_3T_4O_{12})_{1-x}$ nanostructured composites (oral)

Gavrilova T.P., Gerasimova T.P., Katsyuba S.A.: Phosphorus-containing bridging ligands for design of molecular magnets (poster)

Grafe H.-J., Nishimoto S., Iakovleva M., Vavilova E., Spillecke L., Alfonsov A., Sturza M.-I., Wurmehl S., Nojiri H., Rosner H., Richter J., Rößler U., Drechsler S.-L., Kataev V., Büchner B.: Signatures of the field-induced spin-nematic state in the frustrated anisotropic spin-chain compound $LiCuSbO_4$ (invited)

Iakovleva M.F., Vavilova E.L., Grafe H.-J., Kataev V.E., Kaustuv M., Vogl M., Dey T., Wurmehl S., Büchner B.: NMR investigation of Ir-based double perovskites (poster)

Kamashev A.A., Validov A.A., Garifullin I.A., Fominov Ya.V., Leksin P.V., Shumann J., Kataev V., Büchner B.: Superconducting spin-valve effect in heterostructure containing the heusler alloy as the ferromagnetic layer (oral)

Kamashev A.A., Validov A.A., Garifyanov N.N., Garifullin I.A., Fominov Ya.V., Leksin P.V., Shumann J., Thomas J., Kataev V., Büchner B.: Isolation of proximity-induced triplet pairing channel in a superconductor/ferromagnet spin valve (poster)

Muftakhutdinov A.R., Eremina R.M., Mukhamedshin I.R., Matsumoto K., Gilmutdinov I.F.,Cherosov M.A., Moshkina E., Bezmaternykh L.: Magnetic properties of $Mn_{2-x}Mg_xBO_4$ warwickites (poster)

Sakhin V., Kukovitskii E., Garifyanov N., Talanov Yu., Teitel'baum G.: Local magnetic moments in the topological insulators (invited)

Shestakov A.V., Fazlizhanov I.I., Yatsyk I.V., Ibragimova M.I., Eremina R.M.: The oscillations in ESR spectra of $Mn_xHg_{1-x}Te$ in X- and Q-bands (poster)

Vavilova E., Iakovleva M., Grafe H.-J., Valldor M., Büchner B., Kataev V.: NMR investigation of the kagome compound $YBaCo_3AlO_7$ (poster)

International Conference on Phosphorous, Boron and Silicon – PBSi-2017, July 3–5, 2017, Paris, France

Stepanov A.L., Vorobev V.V., Nuzhdin V.I., Valeev V.F., Osin Y.N.: Fabrication of porous silicon with silver nanoparticles by ion implantation (oral)

XI Международная научная школа "Наука и инновации", 5–8 июля 2017, Яльчик, Йошкар-Ола, Россия

Акбари М., Калачёв А.А.: Генерация трёхфотонных состояний в режиме спонтанного параметрического рассеяния в кольцевых микрорезонаторах (приглашён.)

Лапаев Д.В., Никифоров В.Г., Лобков В.С., Князев А.А., Галяметдинов Ю.Г.: Люминесцентные материалы с управляемыми фотофизическими свойствами на основе β-дикетонатных комплексов лантаноидов (III) (пленарн.)

Леонтьев А.В., Нуртдинова Л.А., Жарков Д.К., Шмелёв А.Г, Лобков В.С.: Ультрабыстрая релаксация в кристаллах Ce^{3+}:$LiY_xLu_{1-x}F_4$ (устн.)

Никифоров В.Г.: Фемтосекундная нерезонансная многоимпульсная спектроскопия (пленарн.)

Салихов К.М.: От молекулярного хаоса к порядку (приглаш.)

Степанов А.Л., Воробьёв В.В., Нуждин В.И., Осин Ю.Н., Валеев В.Ф., Курбатова Н.В., Галяутдинов М.Ф.: Алмазная дифракционная решётка, сформированная ионной имплантацией (устн.)

Шмелёв А.Г., Леонтьев А.В., Жарков Д.К., Шамилов Р.Р., Никифоров В.Г., Лобков В.С.: Оптические сверхбыстрые процессы в квантовых точках CdSe/CdS (устн.)

International Workshop "Novel Trends in Physics of Ferroics", July 6–8, 2017, St. Peterburg, Russia

Yatsyk I.V., Gavrilova T.P., Eremina R.M., Parfenov V.V., Kurbakov A.I.: Magnetic properties of Sr-doped ferromangatites of ytterbium (poster)

20th International Conference on Surface Modification of Materials by Ion Beams, July 9–14, 2017, Lisboa, Portugal

Shestakov A.V., Fazlizhanov I.I., Yatsyk I.V., Ibragimova M.I., Shustov V.A., Eremina R.M.: The oscillations of magnetization and derivative of microwave absorption in $Hg_{0.76}Cd_{0.24}Te$ implanted with Ag^+ ions (poster)

The 26th Annual International Laser Physics Workshop (LPHYS'2017), July 17–21, 2017, Kazan, Russia

Akbari M., Kalachev A.: Heralded two-photon sources based on third-order spontaneous parametric down-conversion in mi-croresonators (invited)

Chuprina I.N., An P.P., Zubkova E.V., Kovalyuk V.V., Kalachev A.A., Goltsman G.N.: Optimizing spontaneous four-wave mixing in a ring microresonator (poster)

Kukharchyk N., Sholokhov D., Morozov O., Korableva S.L., Sobgayda D.A., Nizov N.A., Nizov V.A., Gushchin L.A., Zelensky I.V., Akhmedzhanov R.A., Kalachev A.A., Bushev P.A.: Studying isotopically pure crystals for Raman quantum memories (invited)

Latypov I.Z., Talipov A.A., Shmelev A.G., Chuprina I.N.: Generation of pure single-photon states in commercial photonic-crystal fibers on telecommunication frequencies. (poster)

Rogov A., Vorobev V.V., Osin Y.N., Nuzhdin V.I., Valeev V.F., Stepanov A.L.: New-type SERS-active substrates formed with Ag ion implantation of Si (oral)

Samartsev V.V., Mitrofanova T.G.: Correlated signals of free induction decay in CdSe/CdS nanostructures under two- and three-photon excitation by crossed femtosecond laser beams (poster)

Shakhmuratov R.N.: Transformation of the frequency-modulated continuous-wave field into a train of short pulses by resonant filtering through cold and thermal ensembles of alkali atoms (invited)

Sobgayda D.A., Akhmedzhanov R.A., Gushchin L.A., Kalachev A.A., Nizov N.A., Nizov V.A., Zelensky I.V.: Electromagnetically induced transparency in $^{143}Nd^{3+}$:Y_7LiF_4 around ZEFOZ point (invited)

Vagizov F.G., Shakhmuratov, R.N.: Application of Mossbauer effect to study subnanometer harmonic displacements in a thin solid (invited)

International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES-2017), July 17–21, 2017, Prague, Czechia

Gavrilova T., Deeva J., Yatsyk I., Yagfarova A., Gilmutdinov I., Lyadov N., Chupakhina T., Eremina R.: Structural and magnetic properties of nanostructured composites $(SrFe_{12}O_{19})_x(CaCu_3Ti_4O_{12})_{1-x}$ (poster)

Iakovleva M., Grafe H.-J., Vavilova E., Kataev V., Alfonsov A., Nojiri H., Sturza M. I., Wurmehl S., Nishimoto S.,

Drechsler S.-L., Rosner H., Rössler U., Büchner B.: Exotic spin phases in the one-dimensional spin-1/2 quantum magnet $LiCuSbO_4$ as seen by high-field NMR spectroscopy (oral)

Moshrkina E., Eremina R., Gavrilova T., Krug von Nidda H.-A., Bezmaternykh L.: Synthesis and magnetic properties of $Cu_{2.5}Mn_{0.5}BO_5$ ludwigite (poster)

Tumanov V., Goryunov Y., Proshin Y.: Nonmonotonic large oscillations of critical temperature for the superconductor/domain ferromagnet heterostructures (poster)

International Conference on Mesoscopic Transport and Quantum Coherence (official satellite of the LT28), August 5–8, 2017, Espoo, Finland

Goryunov Yu., Nateprov A.: About existance of topological phases of magnetic impurities Eu^{2+} in 3D topological Dirac semimetal Cd_3As_2 (poster)

Goryunov Yu., Nateprov A., Proshin Yu.: Quantum Oscillation of Resistance and Magnetization in Europium-doped 3D Topological Semimetal Cd_3As_2 (poster)

28th International Conference on Low Temperature Physics, August 9–16, 2017, Gothenburg, Sweden

Eremina R., Gavrilova T., Krug von Nidda H.-A., Moshkina E., Bezmaternykh L.: Synthesis and magnetic properties of copper-based ludwigites (poster)

Eremina R., Tarasov V., Yatsyk I., Sukhanov A., Kutovoi S., Zavartsev Y., Zagumennyi A.: ESR study of Y_2SiO_5:Nd^{143} isotopically pure impurity crystals for quantum memory (poster)

Tumanov V., Goryunov Y., Proshin Y.: Origin of large amplitude oscillations of critical temperature for the (FeCrFe)-V-Fe trilayer (poster)

International Baltic Conference on Magnetism, August 20–24, 2017, Svetlogorsk, Russia

Eremina R., Gavrilova T., Moshkina E., Kiiamov A., Yatsyk I., Krug von Nidda H.-A., Bezmaternykh L.: Synthesis and magnetic properties of copper-based ludwigites (poster)

Gavrilova T., Eremina R., Gilmutdinov I., Lyadov N., Kabirov Y., Gavrilyachenko V.: Magnetic properties of heterogeneous materials based of manganites (poster)

6th European Conference on Molecular Magnetism, August 27–31, Bucharest, Romania

Voronkova V.K., Sukhanov A.A., Tyurin V.S.: Photoexcited states of the porhyrin dimers and trimer probed by time-resolved and pulse EPR (стенд.)

Международная конференция "Сканирующая зондовая микросокпия-2017" ("Scanning Probe Microscopy-2017"), 28–30 августа 2017, Екатеринбург, Россия

Баталов Р.И., Нуждин В.И., Валеев В.Ф., Бизяев Д.А., Бухараев А.А., Воробьёв В.В., Осин Ю.Н., Ивлев Г.Д., Степанов А.Л.: Структурные и оптические свойства тонкопленочного сплава GeSi с наночастицами Ag, полученного последовательно ионной имплантацией и лазерным облучением (стенд.)

Бедин С.А., Бизяев Д.А., Бухараев А.А.: Магнитно-силовая микроскопия нанопроволок железа в полимерной матрице (стенд.)

Бухараев А.А., Бизяев Д.А.: Создание и исследование магнитных структур методами сканирующей зондовой микроскопии (устн.)

Морозова А.С., Зиганшина С.А., Бухараев А.А., Зиганшин М.А.: Самоорганизация трипептида L-глицил- L-глицил-L-глицин в плёнках до и после взаимодействия с парами органических веществ по данным АСМ (стенд.)

Морозова А.С., Рогов А.М., Воробьёв В.В., Евтюгин В.Г., Осин Ю.Н., Нуждин В.И., Валеев В.Ф., Степанов А.Л.: Микроскопия периодически структурированных слоёв, сформированных ионной имплантацией (стенд.)

Нургазизов Н.И., Бизяев Д.А., Бухараев А.А., Чукланов А.П.: Исследование изменения поля анизотропии пермаллоевых микрочастиц при их механическом напряжении методами МСМ (устн.)

Рогов А.М., Воробьёв В.В., Осин Ю.Н., Нуждин В.И., Валеев В.Ф., Степанов А.Л.: Сканирующая зондовая микроскопия кремниевых слоёв, имплантированных ионами серебра (стенд.)

Сафиуллина А.С., Зиганшин М.А., Зиганшина С.А., Бухараев А.А.: Изучение самоорганизации линейного и циклического дипептида лейцил-лейцин методом АСМ (стенд.)

XIV Международная конференция "Спектроскопия координационных соединений", 3–9 сентября 2017, Туапсе, 2017

Лапаев Д.В., Никифоров В.Г., Лобков В.С., Князев А.А., Галяметдинов Ю.Г.: Перспективы использования мезогенных β-дикетонатных комплексов лантаноидов(III) в качестве материалов молекулярной фотоники (пленарн.)

Никифоров В.Г., Лапаев Д.В., Лобков В.С., Князев А.А., Галяметдинов Ю.Г., Шухина К.Л.: Влияние фотохимических и фотофизических процессов на люминесцентные свойства пленок β-дикетонатных комплексов лантаноидов(III) (устн.)

20-й Международный дисциплинарный симпозиум "Порядок, беспорядок и свойства оксидов", 5–10 сентября 2017, Ростов-на-Дону, Россия

Гаврилова Т.П., Ерёмина Р.М., Гильмутдинов И.Ф., Лядов Н.М., Кабиров Ю.В., Гавриляченко В.Г., Пруцакова Н.В.: Магнитные свойства гетерогенных материалов на основе манганитов (стенд.)

Гаврилова Т.П., Яцык И.В., Парфенов В.В., Ерёмина Р.М.: Магнитные свойства манганита гольмия (стенд.)

Международная научно-практическая конференция "Аддитивные технологии: оборудование, материалы, применения", 6 сентября 2017, Казань, Россия

Кашапов Р.Н.: Методы борьбы с образованием трещин при селективном лазерном сплавлении изделий из порошка нержавеющей стали 17-4PH (устн.)

"Towards Oxide Based Electronics", September 11–13, 2017, Riga, Latvia

Vavilova E., Iakovleva M., Grafe H.-J., Zimmermann S., Alfonsov A., Luetkens H., Klauss H.-H., Maljuk A., Wurmehl S., Büchner B., Kataev V.: Spin dynamics in the frustrated system $CoAl_2O_4$ (poster)

Advanced Technologies for Detection and Defence against CBRN Sgents, NATO ASI, September 12–20, 2017, Sozopol, Bulgaria

Kavetskyy T.S., Kravtsiv M.M., Telbiz G.M., Nuzhdin V.I., Valeev V.F., Stepanov A.L.: Surface plasmon resonance band of ion-synthesised Ag nanoparticles in high-dose Ag-PMMA nanocomposite films (oral)

Kavetskyy T.S., Zubrytskz K.V., Petkov P., Nuzdin V.I., Valeev V.F., Morozova A.C., Stepanov A.L.: Formation of a periodic structure in chalcogenide film substrate by silver ion implantation (poster)

Trcinski M., Kavetskyy T.S., Stepanov A.L.: Optical band gap and carbon clusters in PMMA nanocomposite films formed by ion implantation: Case of boron, helium and xenon ions (poster)

XI Международный симпозиум по фотонному эхо и когерентной спектроскопии (ФЭКС-2017), 16–21 сентября 2017, Светлогорск, Россия

Акатьев Д.О., Болдырев К.Н., Кузьмин Н.Н., Латыпов И.З., Попова М.Н., Шкаликов А.В., Калачёв А.А.: Перспективы наблюдения спонтанного параметрического рассеяния света при низких температурах (устн.)

Жарков Д.К., Никифоров В.Г., Шмелёв А.Г., Леонтьев А.В., Лобков В.С.: Фемтосекундная время-разрешенная селективная спектроскопия внутримолекулярной и межмолекулярной динамики в жидкостях на основе сверхбыстрого оптического эффекта Керра (устн.)

Калачёв А.А.: Твёрдотельная рамановская квантовая память в микрорезонаторах: соотношение сигнал/шум (приглашён.)

Леонтьев А.В., Нуртдинова Л.А., Жарков Д.К., Шмелёв А.Г., Лобков В.С.: Пикосекундная динамика фотовозбужденных состояний в кристаллах Ce^{3+}:$LiY_xLu_{(1-x)}F_4$ (устн.)

Лисин В.Н., Шегеда А.М., Самарцев В.В.: Биения света во время фотонного эха: наблюдение и применение (пленарн.)

Никифоров В.Г., Лобков В.С., Самарцев В.В.: Спектроскопия низкочастотных межмолекулярных движений в жидкости на основе двухимпульсного фемтосекундного возбуждения сверхбыстрого оптического эффекта Керра (приглашён.)

Самарцев В.В., Митрофанова Т.Г.: Коррелированные сигналы кластерной суперфлуоресценции в наноструктурированных образцах CdSe/CdS в условиях двух- и трёхквантового фемтосекундного возбуждения (стенд.)

Турайханов Д.А., Шкаликов А.В., Латыпов И.З., Калачёв А.А.: Генерация однофотонных состояний с орбитальным угловым моментом в режиме спонтанного параметрического рассеяния в резонаторе (стенд.)

Чуприна И.А., Шухин А.А., Латыпов И.З.: Управление спектральными характеристиками однофотонных состояний света генерируемых в процессе спонтанного четырёхволнового смешения в микроструктурированных волокнах (приглашён.)

Чуприна И.Н., Ан П.П., Зубкова Е.В., Ковалюк В.В., Калачёв А.А., Гольцман Г.Н.: (стенд.)

Шкаликов А.В., Латыпов И.З., Акатьев Д.О., Калачёв А.А.: Приготовление однофотонных состояний в процессе спонтанного параметрического рассеяния света в кристалле PPLN в резонаторе для квантовой памяти на основеYLiF$_4$ (устн.)

Шмелёв А.Г., Леонтьев А.В., Жарков Д.К., Шамилов Р.Р., Никифоров В.Г., Лобков В.С.: Многоцветная сверхбыстрая спектроскопия оптических процессов в квантовых точках CdSe/CdS (устн.)

Шухин А.А., Калачёв А.А.: Бифотонная рефрактометрия на основе спонтанного четырёхволнового смешения в нановолокнах (стенд.)

XXIII Всероссийская конференция "Оптика и спектроскопия конденсированных сред", 17–23 сентября 2017, Краснодар, Россия

Асатрян Г.Р., Шакуров Г.С.: Электронный парамагнитный резонанс Ce-содержащих кристаллов $Y_3Al_5O_{12}$ (устн.)

Важенин В.А., Потапов А.П., Шакуров Г.С., Фокин А.В., Артёмов М.Ю., Козловский В.И.: Точечные дефекты в монокристаллах селенида цинка с примесью железа (устн.)

Тарасов В.Ф., Соловаров Н.К., Жариков Е.В., Субботин К.А.: Эффект квантовых биений в стационарной ЭПР-спектроскопии (устн.)

Шакуров Г.С., Важенин В.А., Потапов А.П., Исаев В.А., Лебедев А.В., Аванесов С.А., Мигачёв С.А.: Широкополосная ЭПР-спектроскопия кристалла YAG:Cr (устн.)

Вторая российская конференция с международным участием: Школа молодых учёных: "Физика – наукам о жизни", 18–22 сентября 2017, Санкт-Петербург

Баязитов А.А., Фаттахов Я.В., Фахрутдинов А.Р., Хабипов Р.Ш., Шагалов В.А.: Разработка датчика поверхностного типа с квадратурным режимом приёма для магнитно-резонансных томографов (устн.)

12-я Международная конференция "Взаимодействие излучений с твёрдым телом ВИТТ-2107", 19–22 сентября 2017, Минск, Беларусь

Базаров В.В., Нуждин В.И., Валеев В.Ф., Степанов А.Л.: Наблюдение методом эллипсометрии аморфного кремния, облученного низкими дозами ионов серебра (устн.)

Баталов Р.И., Баязитов Р.М., Новиков Г.А., Файзрахманов И.А., Шустов В.А., Ивлев Г.Д.: Структура и фотопроводимость сильно легированных слоёв Ge:Sb,

сформированных на подложках Si и Ge ионным распылением и импульсными обработками (устн.)

Баталов Р.И., Баязитов Р.М., Нуждин В.И., Валеев В.Ф., Воробьёв В.В., Осин Ю.Н., Ивлев Г.Д., Степанов А.Л.: Создание методами ионной имплантации и импульсного лазерного отжига композитных слоёв Si и GeSi с наночастицами Ag (стенд.)

Бизяев Д.А., Бухараев А.А., Бедин С.А., Загорский Д.Л., Долуденко И.М.: Магнитно-силовая микроскопия в исследовании металлических нанопроволок, полученных репликацией пор в трековой полимерной матрице (стенд.)

Головчук В.И., Гумаров А.И., Бумай Ю.А., Валеев В.Ф., Лукашевич М.Г., Нуждин В.И., Оджаев В.Б., Харченко А.А., Хайбуллин Р.И.: Модификация оптических свойств оксида цинка имплантацией ионов кобальта (стенд.)

Гумаров А.И., Валеев В.Ф., Головчук В.И., Лядов Н.М., Лукашевич М.Г., Нуждин В.И., Тагиров Л.Р., Файзрахманов И.А., Хайбуллин Р.И.: К вопросу о природе ферромагнетизма в оксиде цинка, имплантированном ионами кобальта (устн.)

Ивлев Г.Д., Прокопьев С.Л., Гацкевич Е.И., Файзрахманов И.А.: Импульсная лазерная обработка и лазерно-индуцированная проводимость тонкопленочного германия (стенд.)

Климович И.М., Зайков В.А., Романов И.А., Осин Ю.Н., Рогов А.М., Степанов А.Л.: Формирование оптически-прозрачных кремниевых покрытий методом магнетронного распыления (стенд.)

Чирков В.В., Гумаров Г.Г., Петухов В.Ю., Бакиров М.М., Валеев В.Ф.: Исследование магнитной анизотропии пленок, полученных при имплантации ионов Co^+ в Si в магнитном поле (стенд.)

XII International Summer School on Vacuum, Electron and Ion Technologies – VEIT-2017, September 25–29, Sozopol, Bulgaria

Stepanov A.L.: Synthesis of metal nanoparticles in dielectrics and semiconductors by ion implantation (invited)

Международная научно-техническая конференция "Актуальные вопросы биологической физики и химии", 2–6 октября 2017, Севастополь, Россия

Юртаева С.В., Ефимов В.Н., Сальников В.В.: ЭПР-спектроскопия биогенных кристаллических оксидов железа в биологических тканях (дистанционное участие)

XXI Международная молодежная научная школа "Когерентная оптика и оптическая спектроскопия", 17–19 октября 2017, Казань, Россия

Бухараев А.А.: Сканирующая зондовая микроскопия магнитных микро- и наноструктур (приглашён.)

Рогов А.М., Воробьёв В.В., Осин Ю.Н., Нуждин В.И., Валеев В.Ф., Степанов А.Л.: SERS-активные подложки нового типа, полученные методом низкодозовой ионной имплантации ионами серебра (устн.)

Самарцев В.В., Митрофанова Т.Г.: Коррелированные наведённые электронные и спиновые "решетки" и их применение в фемтосекундной когерентной спектроскопии и спинтронике (стенд.)

Самарцев В.В., Митрофанова Т.Г.: Коррелированные сигналы кластерной суперфлуоресценции при двух- и трёхквантовом возбуждении наноструктур CdSe/CdS скрещенными наносекундными лазерными пучками (стенд.)

Ханипов Т.Ф., Бизяев Д.А., Бухараев А.А., Чирков В.В., Чукланов А.П., Нургазизов Н.И.: без тезисов (стенд.)

International Symposium "Perspectives on High-Temperature Superconductivity" October 23–25, 2017, Skolkovo, Russia

Teitel'baum G.: The interplay of holes and electrons in the superconducting cuprates (invited)

Международная молодежная конференция "ФизикА", 24–26 октября 2017, С.-Петербург, Россия

Морозова А.С., Зиганшина С.А., Бухараев А.А., Зиганшин М.А.: Самоорганизация трипептида L-глицил- L-глицил -L-глицин в плёнках до и после взаимодействия с парами органических веществ (стенд.)

IX Международная научная конференция "VII Белорусский космический конгресс", 24–26 октября 2017, Минск, Беларусь

Климович И.М., Зайков В.А., Романов И.А., Комаров Ф.Ф., Осин Ю.Н., Воробьёв В.В., Степанов А.Л.: Влияние потенциала смещения и нагрева подложки на оптические свойства Si-покрытий, формируемых методом магнетронного распыления (стенд.)

Степанов А.Л.: Новые перспективные материалы для солнечных элементов на основе пористого кремния с наночастиами серебра, сформированных ионной имплантацией (устн.)

2nd World Congress and Expo on Graphene and 2D Materials November 6–7, 2017, Frankfurt, Germany

Stepanov A.L.: Surface periodic micro-nanostructuring of diamond by boron and silver ion implantation (invited)

IX Всероссийская (с международным участием) научно-техническая конференция "Низкотемпературная плазма в процессах нанесения функциональных покрытий" с элементами научной школы, 5–8 ноября 2017, Казань, Россия

Зиннатуллин А.Л., Вагизов Ф.Г., Лядов Н.М., Файзрахманов И.А.: Гамма-резонансные исследования тонких пленок железа, синтезированных методом напыления с ионным ассистированием (стенд.)

Кашапов Л.Н., Кашапов Р.Н.: Аномальный рост паровоздушной оболочки при протекании плазменно-электролитного процесса в растворе гидрооксида натрия (стенд.)

Кашапов Р.Н.: Возникновение гидродинамических возмущений при плазменно-электролитном процессе (стенд.)

Лядов Н.М., Хайбуллин Р.И., Файзрахманов И.А.: Структура и магнитные свойства тонких плёнок Ni, сформированных методом ионно-стимулированного осаждения (стенд.)

VII Международная конференция "Деформация и разрушение материалов и наноматериалов", 7–10 ноября 2017, Москва, Россия

Фаррахов Б.Ф., Фаттахов Я.В., Галяутдинов М.Ф., Степанов А.Л.: Дилатометрия полиметилметакрилата при низких температурах (стенд.)

XV Международная научная конференция "Оптические технологии и телекоммуникация" ("ООТ-2017") в рамках Второго научного форума "Телекоммуникации: теория и технология – ТТТ-2017", 21–23 ноября 2017, Казань, Россия

Степанов А.Л.: Создание тонкоплёночных дифракционных решеток на алмазе и других диэлектриках при помощи ионной имплантации (пленарн.)

Winter School on Quantum Condensed-Matter Physics, Институт теоретической физики им. Л. Д. Ландау 13–17 December 2017, Chernogolovka, Russia

Sakhin V., Kukovitskii E., Garifyanov N., Khasanov R., Talanov Yu., Teitel'baum G.: Intrinsic magnetic moments in the topological insulators (poster)

Российские конференции

IX Российская научно-практическая конференция "Здоровье человека в XXI веке", 30–31 марта 2017, Казань

Юртаева С.В., Ефимов В.Н., Яфарова Г.Г., Сальников В.В., Фахрутдинов А.Р.: Кристаллические формы оксидов железа в патологических тканях (устн.)

X Семинар по квантовой оптике Д. Н. Клышко, 23–26 апреля 2017, Завидово

Калачёв А.А.: Квантовая память в изотопически чистых примесных кристаллах (приглашён.)

XVI Всероссийская школа-семинар "Физика и применение микроволн" имени проф. А. П. Сухорукова, 4–9 июня 2017, Красновидово

Акбари М., Калачёв А.А.: Трёхфотонное спонтанное параметрическое рассеяние в кольцевых микрорезонаторах (устн.)

XXI Всероссийская конференция по физике сегнетоэлектриков (ВКС-XXI), 25–30 июня 2017, Казань

Калачёв А.А.: Источники неклассических состояний света на основе сегнетоэлектриков с периодической доменной структурой (приглашён.)

Мамин Р.Ф.: Фотостимулированные явления в релаксорах (приглашён.)

Мигачёв С.А., Мамин Р.Ф., Раевский И.П., Раевская С.И.: Фотостимулированные токи в монокристаллах магнониобата и магнониобата-титаната свинца (стенд.)

Хайбуллин Р.И., Валеев В.Ф., Лядов Н.М., Нуждин В.И., Максутоглы М., Микаилзаде Ф.А., Алиева В.Б., Маммадов Т.Г.: Структурные, магнитные и магнитодиэлектрические свойства халькогенидов $TlInS_2$ и $TlGaSe_2$ с имплантированной примесью кобальта (стенд.)

XXIV Всероссийская конференция "Структура и динамика молекулярных систем", 26–30 июня 2017, Яльчик, Йошкар-Ола

Ахметов М.М., Коныгин Г.Н., Рыбин Д.С., Петухов В.Ю., Гумаров Г.Г., Конов А.Б.: ЯМР исследование конформации лекарственного препарата глюконата кальция в водном растворе (стенд.)

Баязитов А.А., Ситдиков И.Р., Хундиряков В.Е.: Разработка приёмно-передающего датчика малого объёма для исследований специализированных малогабаритных магнитно-резонансных томографах (стенд.)

Воробьёва В.Е., Домрачева Н.Е.: ЭПР исследование железосодержащих дендримеров с термо- и фотоуправляемыми свойствами (устн.)

Гафиятуллин Л.Г., Зуева Е.М., Туранова О.А., Милордова Е.О., Овчинников И.В.: Оптические спектры и DFT расчёты комплексов Fe(III) с пентадентатным основанием Шиффа $[Fe(Salten)L]BPh_4$ (стенд.)

Крылатых Н.А., Аникин А.Н., Баязитов А.А., Ситдиков И.Р, Фаттахов Я.В., Фахрутдинов А.Р., Хабипов Р.Ш., Шагалов В.А.: Дифференциация жидкостей с помощью низкополевой ЯМР-томографии и спектроскопии (стенд.)

Овчинников И.В.: Спин-кроссовер (спин-переменные) комплексы. Магнитно-резонансные и оптические методы исследования (пленарн. приглашён.)

Ситдиков И.Р., Баязитов А.А.: Разработка устройства измерения однородности магнитного поля магнитно-резонансного томографа (стенд.)

Туранова О.А., Милордова Е.О., Иванова Т.А., Гафиятуллин Л.Г., Овчинников И.В.: Спиновое состояние комплексов Fe(III) с тетрадентатными основаниями Шиффа в цепочечных структурах (стенд.)

Фролова Е.Н., Иванова Т.А., Туранова О.А., Мингалиева Л.В., Шустов В.А., Овчинников И.В., Зуева Е.М.: ЭПР комплекса [Fe(Salten)Cl] в поликристаллах и застеклованных растворах в ацетонитриле (стенд.)

Хантимеров С.М., Сулейманов Н.М., Димич В.В., Гарипов Р.Р.: Модификаторы на основе углеродных нанотрубок для полимерных композиционных материалов (устн.)

Российская конференция и Школа молодых учёных по актуальным проблемам полупроводниковой фотоэлектроники "Фотоника-2017", 11–15 сентября 2017, Новосибирск

Баталов Р.И., Баязитов Р.М., Новиков Г.А., Лядов Н.М., Шустов В.А., Нуждин В.И.: Особенности люминесценции полупроводниковых кристаллов и стёкол с ионами эрбия, подвергнутых импульсным обработкам (стенд.)

Баталов Р.И., Баязитов Р.М., Новиков Г.А., Файзрахманов И.А., Шустов В.А., Воробьёв В.В., Осин Ю.Н., Ивлев Г.Д.: Создание напряжённых и сильно легированных слоёв n^+-Ge:Sb с использованием мощных лазерных и ионных пучков (устн.)

Баталов Р.И., Баязитов Р.М., Файзрахманов И.А., Лядов Н.М., Володин В.А., Кривякин Г.К., Ивлев Г.Д.: Структура и оптические свойства наночастиц Ge, полученных на поверхности оксидных подложек импульсным лазерным воздействием (стенд.)

Баталов Р.И., Нуждин В.И., Валеев В.Ф., Курбатова Н.В., Воробьёв В.В., Осин Ю.Н., Ивлев Г.Д., Степанов А.Л.: Формирование фоточувствительных слоёв Ag:Si и Ag:GeSi с наночастицами серебра методами ионной имплантации и импульсного лазерного отжига (устн.)

XXIV Симпозиум "Современная химическая физика", 17–28 сентября 2017, Туапсе

Маматова А.А., Савостина Л.И.: Изучение различных конформаций молекул казеина методами квантовой химии (стенд.)

Юбилейный съезд Российского минералогического общества "200 лет РМО", 10–13 октября 2017, Санкт-Петербург,

Мухаметшин А.В., Лопатин О.Н., Николаев А.Г., Галиуллин Б.М., Нуждин В.И., Хайбуллин Р.И.: Имплантация ионов ванадия в структуру природного горного хрусталя (стенд.)

Николаев А.Г., Лопатин О.Н., Хайбуллин Р.И., Нуждин В.И., Мухаметшин А.В.: Ионная имплантация минералов и их синтетических аналогов: современное состояние и перспективы (устн.)

Конференция молодых учёных "Молодёжь и инновации Татарстана", 26–27 октября 2017, Казань

Anisimova E.E.: Peculiarities of the multi-pulse protocols in solid state ^{1}H NMR in Cu(II)-oxamidato complex (устн.)

Бакиров М.М.: К алгоритму определения константы скорости спинового обмена из анализа формы спектра ЭПР раствора парамагнитных зодов (устн.)

Воробьёв В.В.: Эффект усиления комбинационного рассеяния света на ионносинтезированных наночастицах серебра (стенд.)

Гарипов Р.Р.: Разработка электропроводящего композиционного материала на основе полимера и углеродных нанотрубок (устн.)

Камашев А.А.: Возможность генерации спин-поляризованного тока в сверхпроводящем слое

Салихов Т.М.: Магнитные свойства смешанно-валентного соединения $LiMn_2TeO_6$ (устн.)

Фатыхов Р.Р.: Разработка анодного материала для литий-ионных аккумуляторов с улучшенными удельными характеристиками (устн.)

XV Всероссийский молодёжный Самарский конкурс-конференция научных работ по оптике и лазерной физике, 14–18 ноября 2017, Самара

Акатьев Д.О.: Перспективы наблюдения спонтанного параметрического рассеяния света при температуре жидкого гелия (устн.)

Турайханов Д.А.: Генерация однофотонных состояний с орбитальным угловым моментом в режиме спонтанного параметрического рассеяния в нелинейном кристалле (устн.)

Шкаликов А.В., Латыпов И.З., Акатьев Д.О., Калачёв А.А.: Узкополосный однофотонный источник на основе СПР света в PPLN для квантовой памяти (приглашён.)

Шухин А.А.: Экспериментальное исследование спонтанного четырёхволнового смешения в нановолокнах (стенд.)

15-я Всероссийская молодёжная научно-техническая конференция "ИДЕЛЬ-15" в области естественных наук (финал программы УМНИК), 20–22 ноября 2017, Казань

Гарипов Р.Р.: Разработка электропроводящего композиционного материала на основе полимера и углеродных нанотрубок (устн.)

Сулейманов Н.М., Хантимеров С.М., Шустов В.А., Киржек К., Фатыхов Р.Р., Гарипов Р.Р.: Структурные и электрохимические свойства литированных конических углеродных нанотрубок как анодных материалов для литий-ионных аккумуляторов (устн.)

Научно-техническая конференция по итогам совместного конкурса фундаментальных исследований РФФИ-РТ, 23–24 ноября 2017, Казань

Салихов К.М., Волков М.Ю., Воронкова В.К., Зарипов Р.Б., Конов К.Б., Мамедов М.Д., Милановский Г.Е., Петрова А.А., Семенов А.Ю., Суханов А.А.: Исследование молекулярного механизма стабилизирующего и криопротекторного влияния трегалозы на функциональные свойства белков и белковых комплексов фотосинтетических реакционных центров (устн.)

Степанов А.Л.: Алмазная дифракционная решётка (устн.)

Сулейманов Н.М., Хантимеров С.М., Шустов В.А., Киржек К., Фатыхов Р.Р., Гарипов Р.Р.: Структурные и электрохимические свойства литированных конических углеродных нанотрубок как анодных материалов для литий-ионных аккумуляторов (устн.)

Тарасов В.Ф., Зарипов Р.Б., Суханов А.А., Жариков Е.В., Субботин К.А. Дудникова В.Б.: Структура и магнитные свойства примесных центров иттербия в синтетическом форстерите (устн.)

Международная научно-техническая конференция "Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы-2017" (МНТК "ИМТОМ-2017"), 6–8 декабря 2017, Казань

Фатыхов Р.Р., Хантимеров С.М., Базаров В.В., Сулейманов Н.М.: Пористые наноструктурированные материалы для электродов литий-ионных аккумуляторов (устн.)

Хантимеров С.М., Сулейманов Н.М., Гарипов Р.Р.: Перспективные композиционные материалы для нужд общего и специального машиностроения (устн.)

Итоговая конференция молодых учёных КФТИ КазНЦ РАН 13 апреля 2017, Казань

Баязитов А.А., Хундиряков В.Е.: Разработка конструкции датчика малого объёма принимающего сигнал в области кисти, для малогабаритных травматологических магнитно-резонансных томографов с полем 0.4 Тл (устн.)

Гаврилова Т.П., Ерёмина Р.М., Гильмутдинов И.Ф., Кабиров Ю.В.: Магнитные явления на интерфейсе двух твёрдых фаз (плен.)

Гаврилова Т.П., Деева Ю., Яцык И.В., Ягфарова А., Чупахина Т., Ерёмина Р.М.: Структура и магнитные свойства композитных материалов $(SrFe_{12}O_{19})_x(CaCu_3Ti_4O_{12})_{1-x}$ (устн.)

Гарипов Р.Р., Хантимеров С.М.: Особенности очистки углеродных нанотрубок (устн.)

Гафиятуллин Л.Г., Зуева Е.М., Туранова О.А., Милордова Е.О., Фролова Е.Н., Овчинников И.В.: Исследование разнолигандных комплексов Fe(III) с пентадентатным основанием Шиффа состава $[Fe(Salten)L]BPh_4$ методом УФ-спектроскопии (плен.)

Ликеров Р.Ф., Яцык И.В., Гаврилова Т.П., Ерёмина Р.М., Кутовой С.А.: Определение параметров кристаллического поля ионов $^{143}Nd^{3+}$ в Y_2SiO_5 (устн.)

Лядов Н.М., Вахитов И.Р., Гумаров А.И., Хайбуллин Р.И., Шустов В.А., Файзрахманов И.А.: Исследование структурно-фазового состава и магнитных свойств тонких плёнок железа (устн.)

Шестаков А.В., Фазлижанов И.И., Яцык И.В., Ибрагимова М.И., Шустов В.А., Ерёмина Р.М.: Осцилляции в ЭПР спектрах $HG_{0.76}CD_{0.24}TE:AG^+$ в X- и Q-диапазонах (устн.)

Гости института

- Мацуока Хидето, доктор, Университет Осаки, Осака, Япония (участие в международной конференции)
- Ши Фажан, доктор, Научно-технический университет Китая, Хэфэй, Китай (участие в международной конференции)
- Виеру Вячеслав, доктор, Лёвенский католический университет, Лёвен, Бельгия (участие в международной конференции)
- Айххофф Уве, доктор, научный консультант, Брукер-Биоспин, Райнштеттен, Германия (участие в международной конференции)
- Биттл Роберт, профессор, Свободный университет Берлина, Берлин, Германия (участие в международной конференции)
- Боуман Майкл, доктор, проф., Университет Алабамы, Тускалуза, США (участие в международной конференции)
- Зик Клаус, сотрудник, Брукер БиоСпин, Райнштеттен, Германия
- Каптейн Роберт, доктор, проф., Утрехтский университет, Утрехт, Нидерланды (участие в международной конференции)
- Лихтенштейн Герц, проф., Университет Бен-Гуриона, Беер-Шева, Израиль (участие в международной конференции)
- Охта Хитоши, доктор, проф., Университет Кобе, Кобе, Япония (участие в международной конференции)
- Сато Кацунобу, проф., Университет Осаки, Осака, Япония (участие в международной конференции)
- Такуи Такеши, доктор, проф., Университет Осаки, Осака, Япония (участие в международной конференции)
- Халиуллин Гиниятулла, доктор, Институт физики твёрдого тела Макса Планка, Штутгарт, Германия (участие в международной конференции)
- Хубер Мартина, доктор, проф., Лейденский университет, Лейден, Нидерланды (участие в международной конференции)
- Цейтлин Марк, доктор, Университет Западной Виргинии, Моргантаун, США (участие в международной конференции)

- Аганов Альберт Вартанович, к.ф.-м.н., д.х.н., проф., Казанский (Приволжский) федеральный университет (участие в заседаниях диссертационного совета)
- Алакшин Егор Михайлович, к.ф.-м.н., Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань (участие в международной конференции)
- Аминов Линар Кашифович, д.ф.-м.н., проф., член-корр. АН РТ, Казанский (Приволжский) федеральный университет (участие в заседаниях диссертационного совета)
- Андреев Николай Кузьмич, д.т.н., проф., Казанский государственный энергетический университет (участие в международной конференции)
- Анищик Сергей Владимирович, Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН, Новосибирск (участие в международной конференции)

- Ахмедов Наиль Равильевич, аспирант, Альметьевский государственный нефтяной институт, Альметьевск (участие в конференции “Молодёжь и инновации Татарстана”)
- Ацаркин Вадим Александрович, д.ф.-м.н., проф., Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Москва (участие в международной конференции)
- Багрянская Елена Григорьевна, д.ф.-м.н., проф., директор Новосибирского института органической химии им. Н. Н. Ворожцова СО РАН, Новосибирск (участие в международной конференции)
- Байбеков Эдуард Ильдарович, к.ф.-м.н., Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань (участие в международной конференции)
- Буньков Юрий Михайлович, д.ф.-м.н., Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань (участие в международной конференции)
- Вафина Алина Рамилевна, инженер, Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань (участие в конференции “Молодёжь и инновации Татарстана”)
- Волков Дмитрий Васильевич, студент, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва (участие в международной конференции)
- Воробьёв Юрий Николаевич, с.н.с., Казанский научно-исследовательский институт авиационных технологий (участие в конференции “Молодёжь и инновации Татарстана”)
- Габбасов Булат Фаритович, аспирант, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань (участие в международной конференции)
- Гафуров Марат Ревгерович, к.ф.-м.н., Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань (участие в международной конференции)
- Горбованов Александр Иванович, к.ф.-м.н., Физико-технический институт Крымского федерального университета им. В. И. Вернадского, Симферополь (участие в международной конференции)
- Двинских Сергей Вячеславович, д.ф.-м.н., Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург (участие в международной конференции)
- Демишев Сергей Васильевич, д.ф.-м.н., Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Москва (участие в международной конференции)
- Джепаров Фридрих Саламонович, д.ф.-м.н., проф., Институт теоретической и экспериментальной физики им. А. И. Алиханова Национального исследовательского центра “Курчатовский институт”, Москва (участие в международной конференции)
- Дзюба Сергей Андреевич, д.ф.-м.н., проф., Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН, Новосибирск (участие в международной конференции)
- Енкин Николай, к.ф.-м.н., Институт биофизической химии Макса Планка, Геттинген, Германия (участие в международной конференции)
- Жихарев Валентин Александрович, д.ф.-м.н., проф., Казанский государственный технологический университет (участие в заседаниях диссертационного совета)
- Загорский Дмитрий Львович, к.ф.-м.н., ФНИЦ “Кристаллография и фотоника”, Москва (обсуждение кандидатской диссертации)
- Зверева Елена Алексеевна, с.н.с., Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва (участие в международной конференции)
- Зеленский Илья Владимирович, к.ф.-м.н., Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород (участие в международной конференции)
- Зуев Юрий Федорович, д.х.н., проф., зам. директора Казанского института биофизики и биохимии (участие в заседаниях диссертационного совета)
- Идрисов Айрат Ренатович, аспирант, Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань (участие в конференции “Молодёжь и инновации Татарстана”)
- Ильясов Ахат Вахитович, д.ф.-м.н., проф., акад. АН РТ, советник Президиума АН РТ, Казань (участие в международной конференции, участие в заседаниях диссертационного совета)
- Кокорин Александр Ильич, д.х.н., проф., Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова РАН, Москва (участие в международной конференции)
- Кочелаев Борис Иванович, д.ф.-м.н., проф., Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань (участие в международной конференции)
- Ле Николай, аспирант, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва (участие в международной конференции)
- Львов Дмитрий Сергеевич, аспирант, Институт физики твёрдого тела РАН, Черноголовка (участие в конференции “Молодёжь и инновации Татарстана”)
- Мамадазизов Султоназар Шодиевич, аспирант, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград (участие в международной конференции)
- Марьясов Александр Георгиевич, к.ф.-м.н., Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН, Новосибирск (участие в международной конференции)
- Мельников Александр Сергеевич, д.ф.-м.н., Институт физики микроструктур РАН, Н. Новгород (участие в международной конференции)
- Мершиев Николай Георгиевич, инженер, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград (участие в международной конференции)
- Миронов Виктор Леонидович, д.ф.-м.н., Институт физики микроструктур РАН, Н. Новгород (участие в международной конференции)
- Морозов Олег Игоревич, ассистент, Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск (участие в конференции “Молодёжь и инновации Татарстана”)

- Никитина Анастасия Валерьевна, студентка, Санкт-Петербургский электротехнический университет (участие в международной конференции)
- Полулях Сергей Николаевич, д.ф.-м.н., Физико-технический институт Крымского федерального университета им. В. И. Вернадского, Симферополь
- Польшаков Владимир Иванович, д.х.н., проф., Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва (участие в международной конференции)
- Птушенко Василий Витальевич, к.ф.-м.н., Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва (участие в международной конференции)
- Рогов Алексей Михайлович, аспирант, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань (участие в конференции “Молодёжь и инновации Татарстана”)
- Рязанов Валерий Владимирович, д.ф.-м.н., заведующий лабораторией сверхпроводимости, Институт физики твёрдого тела РАН, Черноголовка (участие в международной конференции)
- Самошкина Юлия Эрнестовна, инженер-исследователь, институт физики им. Л. В. Киренского СО РАН, Красноярск (участие в международной конференции)
- Сапига Алексей Владимирович, к.ф.-м.н., Физико-технический институт Крымского федерального университета им. В. И. Вернадского, Симферополь (участие в международной конференции)
- Сафиуллина Айгуль Равильевна, аспирантка, Казанская государственная академия ветеринарной медицины имени Н. Э. Баумана, Казань (участие в конференции “Молодёжь и инновации Татарстана”)
- Свистов Леонид Евгеньевич, д.ф.м.н., Институт физических проблем им. П. Л. Капицы РАН, Москва (участие в международной конференции)
- Сергеев Николай, профессор, Институт физики, Щецинский государственный университет, Польша (участие в международной конференции)
- Смирнов Александр Иванович, д.ф.-м.н., проф., Институт физических проблем им. П. Л. Капицы РАН, Москва (участие в международной конференции)
- Тагиров Мурат Салихович, д.ф.-м.н., проф., Казанский (Приволжский) федеральный университет (участие в международной конференции)
- Таюрский Таюрский Дмитрий Альбертович, д.ф.-м.н., проф., Казанский (Приволжский) федеральный университет (участие в заседаниях диссертационного совета)
- Толстой Пётр Михайлович, к.ф.-м.н., Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург (участие в международной конференции)
- Туманов Сергей Витальевич, аспирант, Институт “Международный томографический центр” СО РАН, Новосибирск (участие в международной конференции)
- Тупикина Елена Юрьевна, аспирантка, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург (участие в международной конференции)
- Усманова Юлдуз Хайруллоевна, аспирантка, Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань (участие в конференции “Молодёжь и инновации Татарстана”)
- Файн Борис, д.ф.-м.н., проф., Сколковский институт науки и технологий, Сколково (участие в международной конференции)
- Федин Матвей Владимирович, д.ф.-м.н., Институт “Международный томографический центр” СО РАН, Новосибирск (участие в международной конференции, обсуждение кандидатской диссертации)
- Фельдман Эдуард Беньяминович, д.ф.-м.н., Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка (участие в международной конференции)
- Фраерман Андрей Александрович, д.ф.-м.н., Институт физики микроструктур РАН, Н. Новгород (участие в международной конференции, обсуждение кандидатской диссертации)
- Хундиряков Вадим Евгеньевич, студент, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань (участие в конференции “Молодёжь и инновации Татарстана”)
- Щербаков Игорь Александрович, студент, Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань (участие в конференции “Молодёжь и инновации Татарстана”)
- Якушкин Станислав Сергеевич, к.ф.-м.н., Институт катализа им. Г. К. Борескова, СО РАН, Новосибирск (участие в международной конференции)
- Янилкин Игорь Витальевич, к.ф.-м.н., Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань (участие в международной конференции)

Заказ Отпечатано с оригиналов заказчика
АО “Информационно-издательский центр” • Казань, ул. Чехова 28, телефон +7 (843) 236 94 26.

ФИЗТЕХПРЕСС
2018

ISBN 978-5-94469-041-8