

Учреждение Российской Академии наук
ИНСТИТУТ СПЕКТРОСКОПИИ РАН



ИНСТИТУТУ СПЕКТРОСКОПИИ РАН – 40 лет

Ответственный редактор член-корреспондент РАН ***Е.А.Виноградов***

Троицк Московской обл.
Издательство «Тровант»

2008

УДК 001
ББК 72.3
И 71

Печатается по решению
Ученого совета Института спектроскопии РАН
Ответственный за выпуск ученый секретарь Е.Б.Перминов

И71

Институту спектроскопии РАН – 40 лет / отв.редактор Е.А.Виноградов;
Рос. Акад. наук, Институт спектроскопии РАН.
Троицк Моск.обл.: Изд-во «Тривант», 2008. 247 с.
ISBN _____

Издание посвящено 40-летнему юбилею Института спектроскопии – одному из первых институтов, построенных в Троицком научном центре Российской академии наук.

В издании отражены направления, современное состояние, достижения и перспективы научных исследований Института, а также его деятельность в области подготовки научных кадров.

УДК 001
ББК 72.3

ISBN _____

© Коллектив авторов, 2008
© Институт спектроскопии РАН, 2008
© Изд-во «Тривант»

Институт спектроскопии РАН

г. Троицк Московской области, ул. Физическая, 5

www.isan.troitsk.ru isan@isan.troitsk.ru

ДИРЕКТОРА ИНСТИТУТА



МАНДЕЛЬШТАМ

Сергей Леонидович

*Член-корреспондент АН СССР,
основатель и первый директор
Института (1968-1988).*

Основные работы в области атомной спектроскопии и ее приложений, в том числе и для внеатмосферной астрономии. Получил и исследовал в лабораторных условиях и в спектрах солнечных вспышек спектры высокоионизированных атомов. Изучил условия ионизации и возбуждения атомов и ионов в плазме, уширения и сдвига спектральных линий. Впервые измерил температуру молнии и разработал гидродинамическую теорию искрового разряда. Выполнил обширные исследования по теории и практике спектрального анализа и его внедрению в промышленность. Всесторонне изучил рентгеновское излучение Солнца, установил, что оно имеет в основном термическую природу и состоит из квазипостоянной и медленно изменяющейся компонент. Обнаружил поляризацию излучения, исследовал спектры, структуры и локализацию рентгеновских вспышек.



ВИНОГРАДОВ

Евгений Андреевич

*Член-корреспондент РАН,
директор Института (с 1989 по н.в.)*

Основные работы в области спектроскопии твердого тела и ее приложений. Разработал метод исследования термостимулированного излучения поляритонов. Этим методом обнаружил и исследовал: радиационные поверхностные поляритоны кристаллов и пленок; обнаружил гигантские резонансы электромагнитных мод пленки с дипольными возбуждениями материала пленки, приводящие к усилению ИК поглощения до 10^5 раз, а также добавочные волны на интерфейсных поляритонах в тонкопленочных структурах; фотоиндуцированное изменение оптических свойств пленок, приводящее к сверхбыстрому (< 50 фс) изменению отражения света на частотах интерференционных мод пленок. Разработал принципы построения ИК спектрометров с высокой фотометрической точностью и с их помощью обнаружил и исследовал структурные фазовые переходы в кристаллах со слоистой и слоисто-цепочечной структурой.

ВВЕДЕНИЕ

Институт спектроскопии РАН (ИСАН) является правопреемником Института спектроскопии АН СССР, организованного в 1968 году на базе лаборатории Комиссии по спектроскопии АН СССР. Первоначально задачей лаборатории было обеспечение научно-организационной деятельности Комиссии по спектроскопии - решение ряда научно-технических задач, обучение и подготовка кадров и др. Со временем деятельность лаборатории вышла далеко за первоначально намеченные рамки. В ней развернулась большая научно-исследовательская работа, сосредоточенная на спектральном приборостроении и внедрении в народное хозяйство атомной и молекулярной спектроскопии. Штат лаборатории вырос до 44 человек, сотрудники лаборатории защитили 2 докторские и 7 кандидатских диссертаций, опубликовали 160 научных работ и ряд монографий. Появились серьезные научные и практические результаты. Лаборатория Комиссии по спектроскопии превратилась в самостоятельное научное учреждение с высококвалифицированными кадрами. 10 ноября 1967 года Президиум АН СССР принял постановление о целесообразности реорганизации лаборатории Комиссии в Институт спектроскопии АН СССР. Институт должен был стать головным в области спектроскопии в СССР.

Вскоре последовало согласие Государственного Комитета по науке и технике на создание института, и 29 ноября 1968 года вышло постановление Президиума АН СССР о реорганизации Лаборатории в Институт.

По предложению Академика-секретаря ООФА академика Л.А.Арцимовича строительство Института спектроскопии было намечено в создаваемом в то время Научном центре в Красной Пахре, где уже существовали ИЗМИРАН и ИФВД.

Организатором, первым директором и идеологом направления научных исследований Института стал доктор физико-математических наук, профессор Сергей Леонидович Мандельштам, впоследствии член-корреспондент АН СССР. Ядром Института стала группа сотрудников лаборатории Комиссии по спектроскопии: С.А.Ухолин, Х.Е.Стерин, Г.Н.Жижин, В.Б.Белянин, Я.М.Кимельфельд, Э.Я.Кононов, М.П. Алиев, С.Н.Мурзин. Из ФИАНа в ИСАН перешли В.Г.Колошников, Б.Д.Осипов, В.С.Летохов, Р.В.Амбарцумян, О.Н.Компанец, О.А.Туманов, из Обнинска – В.М.Агранович, из МГПИ им. В.И.Ленина – Р.И.Персонов. С 1971 г. по 1977 г. в Институте работал С.Г.Раутиан. Привлечение известных ученых позволило быстро создать высококвалифицированный научный коллектив. Одновременно штат Института пополнялся молодыми способными выпускниками Московского физико-технического института, которые до сих пор работают в Институте и занимают ключевые позиции в мировом рейтинге ученых.

По замыслу С.Л.Мандельштама численность Института не должна была превышать трехсот-четырехсот человек. Небольшие по численности лаборатории позволяли руководителям заниматься прежде всего научной, а не административной работой и мобильно менять тематику исследований.

В настоящее время в штате Института насчитывается 239 человек, из них 113 – научные сотрудники, в числе которых 30 докторов и 45 кандидатов наук. Бессменным директором Института с 1989 года является профессор (с 2008 года - член-корреспондент РАН) Евгений Андреевич Виноградов.

В научной структуре института находятся:

отдел атомной спектроскопии — зав. отделом д.ф.-м.н. А.Н.Рябцев. В составе отдела: лаборатория атомной спектроскопии (зав. лабораторией д.ф.-м.н. А.Н.Рябцев) и лаборатория спектроскопии плазмы (зав. лабораторией к.ф.-м.н. К.Н.Кошелев);

отдел молекулярной спектроскопии — зав. отделом к.ф.-м.н. В.Г.Колошников. В составе отдела: лаборатория молекулярной спектроскопии высокого разрешения и аналитической спектроскопии (зав. лабораторией к.ф.-м.н. В.Г.Колошников) и два сектора: сектор микроволновой спектроскопии (зав. сектором д.ф.-м.н. Б.С.Думеш) и сектор электронных спектров молекул (зав. сектором д.ф.-м.н. Ю.Г.Вайнер);

отдел спектроскопии твердого тела — заведующий отделом чл.-корр. РАН Е.А.Виноградов. В составе отдела: лаборатория спектроскопии конденсированных сред (зав. лабораторией д.ф.-м.н. Б.Н.Маврин), лаборатория спектроскопии полупроводниковых структур (зав. лабораторией чл.-корр. РАН Е.А.Виноградов) и сектор фурье-спектроскопии центра коллективного пользования ИСАН "Оптико-спектральные измерения" (руководитель профессор М.Н.Попова);

отдел лазерной спектроскопии — зав. отделом профессор В.С.Летохов. В составе отдела: лаборатория лазерной спектроскопии (зав. лабораторией д.ф.-м.н. В.И.Балыкин), лаборатория спектроскопии возбужденных состояний молекул (зав. лабораторией д.ф.-м.н. Е.А.Рябов), лаборатория спектроскопии ультрабыстрых процессов (зав. лабораторией д.ф.-м.н. С.В.Чекалин) и сектор фемтосекундной спектроскопии центра коллективного пользования ИСАН "Оптико-спектральные измерения" (руководитель к.ф.-м.н. Ю.А.Матвеев);

отдел лазерно-спектрального приборостроения — зав. отделом д.ф.-м.н. О.Н.Компанец;

теоретический отдел — зав. отделом профессор В.М.Агранович. В составе отдела: сектор спектроскопии фазовых переходов (зав. сектором д.ф.-м.н. А.Г.Мальшуков) и сектор нелинейной спектроскопии (зав. сектором д.ф.-м.н. С.А.Дарманян);

лаборатория спектроскопии наноструктур — зав. лабораторией к.ф.-м.н. Ю.Е.Лозовик;

лаборатория экспериментальных методов спектроскопии — зав. лабораторией к.ф.-м.н. Е.Б.Перминов.

Все основные вопросы научной и организационной деятельности Института решаются Ученым советом, в состав которого вошли ведущие научные сотрудники Института: Е.А.Виноградов (председатель), О.Н.Компанец (зам.председателя), Е.Б.Перминов (ученый секретарь), В.М.Агранович, Б.П.Антонюк, В.И.Балыкин, М.А.Большов, Л.А.Бурева, Ю.Г.Вайнер, Б.С.Думеш, А.М.Камчатнов, В.Г.Колошников, К.Н.Кошелев, В.С.Летохов, Ю.Е.Лозовик, Б.Н.Маврин, Г.Н.Макаров, А.Г.Мальшуков, Ю.А.Матвеев, А.В.Наумов, М.Н.Попова, Е.А.Рябов, А.Н.Рябцев, С.В.Чекалин, Е.П. Чукалина, В.А.Яковлев.

В Институте работает специализированный Ученый совет по присуждению ученых степеней кандидата и доктора физико-математических наук по специальностям "оптика" и "теоретическая физика" (председатель специализированного Совета — Е.А.Виноградов, ученый секретарь — М.Н.Попова).

Институт имеет лицензию на ведение образовательной деятельности в сфере послевузовского образования (т.е. в очной и заочной аспирантуре) по

следующим специальностям: "Оптика", "Теоретическая физика", "Физика конденсированного состояния" и "Лазерная физика".

При Институте работает базовая кафедра квантовой оптики Московского физико-технического института (зав. кафедрой профессор Е.А.Виноградов, зам. зав. кафедрой доцент В.Г.Колошников), которая обеспечивала все эти годы постоянный приток в ИСАН талантливой молодежи.

Институт располагает уникальным комплексом оборудования, обеспечивающим проведение проблемно-ориентированных оптических исследований одновременно в широком спектральном диапазоне, со сверхвысоким спектральным, временным и пространственным разрешением, что позволяет проводить взаимодополняющие исследования материалов и процессов на единой научной платформе с получением достоверной детальной информации о структуре, оптических и магнитных свойствах, спектроскопических, релаксационных и других характеристиках различных материалов и структур с сохранением их свойств и функциональной активности.

Уникальные приборы и установки Института входят в состав научного оборудования Центра коллективного пользования "Оптико-спектральные измерения" ИСАН (ЦКП ИСАН):

- лазерный широкодиапазонный фемтонанооптический спектрометрический комплекс, не имеющий аналогов в Европе, созданный на базе последних моделей твердотельных лазеров фирмы *Newport/Spectra Physics*, лазерного проекционного спектромикроскопа, параметрических преобразователей частоты и системы регистрации разработки ИСАН.

- несколько современных фурье-спектрометров фирмы *BRUKER*, в том числе, вакуумный широкодиапазонный фурье-спектрометр IFS-125HR со спектральным диапазоном 0,2-2000 мкм и предельным разрешением $0,001\text{ см}^{-1}$, также не имеющий себе равных в мире.

Более подробные сведения о приборах и установках ЦКП приведены в соответствующих разделах этого издания.

За последние годы ЦКП ИСАН предоставил услуги более чем 40 научным организациям по 52 темам. В портфеле ЦКП ИСАН всегда лежат письма-заявки с просьбой запланировать проведение новых совместных экспериментов на научном оборудовании ЦКП по исследованию наноструктур и новых материалов с предоставлением исследуемых образцов. География обращений весьма широка: ИФ СО РАН (г.Красноярск), ИЛФ СО РАН (г. Новосибирск), ИОА СО РАН (г.Томск), СПГУ ИТМО, ВНЦ «ГОИ» (г.Санкт-Петербург), КазГУ (г.Казань) и институты КазНЦ РАН, ИФМ УрО РАН (Екатеринбург), ИФМ (г.Н.-Новгород), БГТУ (Брянск), ОИЯИ (Дубна), ИФТТ РАН (Черноголовка М.о.), ТИСНУМ, ИФВД РАН (Троицк М.о.), ИОФАН, НЦВО РАН, ФИАН, ИРЭ РАН, ИФХЭ РАН, НТЦ УП РАН, МГУ и его факультеты/институты, МИТХТ, МГИСИС (Москва), а также зарубежье: Парижский VI Университет, НЦНИ, Лаборатория им. Эме Коттон и Парижская обсерватория (Франция), университет г.Гренинген (Голландия), университет Новой Шотландии (Канада), Технион (Израиль), Кембриджский и Ноттингемский университеты (Англия), CRC (Венгрия) и др.

Естественно, наибольший объем услуг предоставляется научным организациям Центрального региона страны и главным образом Москвы и Московской области. О роли ЦКП ИСАН в научных исследованиях региона говорит также то, что в планах правительства Московской области стоит создание в Троицке на базе ЦКП ТИСНУМ и ЦКП ИСАН первого в Московской области крупного регионального распределенного ЦКП «Структурная и спектральная диагностика материалов» с расширением предоставляемых ими услуг.

Спектроскопия – динамично развивающаяся наука. Каждые несколько лет в ней возникают новые направления исследований. Все они представлены в Институте:

- оптика ближнего поля (эванесцентная спектроскопия);
- фемтосекундная спектроскопия;
- квантовая электродинамика микрополости;
- новые источники излучения с уровнем шума ниже квантового предела;
- спектроскопия единичных атомов и молекул;
- атомная оптика (лазерное управление движением атомов) и многое другое.

Вместе с новыми фундаментальными направлениями исследований в ИСАН рождаются и новые технологии:

- лазерное разделение изотопов;
- ультрачувствительные методы контроля состава сверхчистых материалов и загрязнения окружающей среды;
- создание сверхплотной плазмы;
- глубокое охлаждение атомов лазерным излучением;
- новые источники излучения;
- новые системы связи и множество разнообразных датчиков, многое другое.

Ежегодно учеными института публикуются 120-140 научных статей в ведущих реферируемых журналах, книги и монографии, делается более 30 докладов на международных научных конференциях.

Ниже приведены наиболее важные научные результаты мирового уровня, полученные в ИСАН за последние пять лет, имеющие серьезную перспективу их использования в высоких технологиях.

1. Проведен комплекс исследований по созданию источников излучения в области экстремального ультрафиолета 10÷17 нм для нанолитографии. Результатом исследований стало создание лабораторного источника с остроумной схемой использования жидкого олова в качестве рабочего элемента с выходом излучения на длине волны 13,5 нм, достаточным для промышленного применения такого источника излучения в фотонанолитографическом производстве сверхбольших и сверхскоростных интегральных микросхем [1-7].

2. Предложена концепция атомной нанооптики на основе «фотонных точек» и «фотонных дырок». На основе этой концепции предложена новая технология производства большого количества ($>10^7$) идентичных атомарных наноустройств и наноэлементов с характерными размерами в диапазоне 20 нм методом прямого (минуя стадию литографии) осаждения атомов на поверхность кремния с использованием принципа камеры-обскуры и лазерных нанополей, и уже получены идентичные наноструктуры размером меньше 50 нм [8-11].

3. Получены при облучении импульсным лазерным излучением фемтосекундной длительности каких-либо материалов или массива углерод-, кремний-содержащих нанотрубок и последующем пропускании фотопродуктов (фрагментов) сквозь нанокапилляр (<100 нм) сжатые во временном масштабе узконаправленные нанолокализованные в пространстве пучки (например, кремний-содержащих фрагментов), которые можно использовать в контролируемом процессе модификации рельефа и химического состава поверхности различных материалов и структур [12-15].

4. Предложена и исследована возможность обнаружения отдельного атома единичным фотоном с нанометровым пространственным и наносекундным временным разрешением (атомный нанозонд с единичным фотоном). Полученные

результаты имеют большое практическое значение для детектирования одиночных атомов с высокой эффективностью, в том числе для создания сверхчувствительных детекторов [16].

5. Предложена и экспериментально реализована схема дифракции атомов на образованной лазерными лучами управляемой дифракционной решётке, позволяющая осуществлять пространственный и временной контроль атомного пучка аналогично электронному пучку в электронной оптике. Показана возможность создания «атомно-лучевой трубки» для целей атомной и молекулярной нанолитографии. В эксперименте с использованием магнито-оптической ловушки получены ультрахолодные атомы с температурой $T \sim 10^{-4}$ К (совместно с Университетом электрокоммуникаций, Токио, Япония) [17,18].

6. Развита теория транспорта спиновой поляризации электронов в полупроводниковых микроструктурах и опто-электрических свойств предсказанных в ИСАН принципиально новых наноматериалов – гибридных гетероструктур, образованных слоями органических и полупроводниковых наноплёнок. Полученные результаты важны как для развития спинтроники – нового направления твердотельной электроники, так и для создания высокоэффективных оптических источников излучения с электрической накачкой [19-20].

7. Проведен комплекс исследований и изготовлены портативные биосенсорные устройства для экспрессного определения биологически активных и токсичных соединений (БАС) в жидкости в задачах клинической медицины, фармакологии, пищевой и биотехнологической промышленности (совместно с ИМБ РАН). Новизна технологии, защищенной российскими и международными патентами, состоит в использовании наноконструкций на основе ДНК в качестве биодатчиков, способных распознавать БАС (разработка ИМБ РАН), и портативного дихрометра, измеряющего аномальный оптический сигнал, генерируемый при взаимодействии БАС из анализируемой жидкости с ДНК-биодатчиком [21-23].

8. Предложен и реализован микрооптоакустический лазерный детектор следов примесных молекул в воздухе, основанный на принципах лазерной оптоакустической спектроскопии с использованием кварцевого камертона высокой добротности. Прибор позволяет детектировать утечки токсичных и взрывоопасных веществ на химических производствах и в местах их хранения, проводить анализ газов в замкнутых объемах с предельной чувствительностью (единицы *ppb*) и огромным ($>10\,000$) динамическим диапазоном при крайне малом необходимом объеме газовой смеси ($\sim 0,1$ куб.мм) [24,25].

9. Разработан новый метод диагностики индивидуальных параметров молекулярных нанообъектов, основанный на измерении оптических спектров одиночных хромофорных молекул, используемых в качестве нанозонда. Принципиальные преимущества такого наноинструмента – получение разнообразной микроскопической информации о среде, в том числе и в условиях отсутствия усреднения по ансамблю примесных молекул и изучаемых нанообъектов [26-30].

10. Предложено с новых позиций приступить к разработке оптического нанотранзистора и интегральных схем на его основе, обладающих неоспоримыми достоинствами в сравнении с традиционными электронными элементами и схемами. Достигнутый уровень изготовления оптических нановолокон и результаты проведенных в ИСАН (совместно с учеными Японии и Германии) исследований позволяют спроектировать оптический нанотранзистор с минимально возможным количеством материала (единичные атомы) и

минимальным количеством управляющей транзистором энергии (единичные фотоны) [31-40].

По данным зарубежных источников, Институт спектроскопии наравне с крупнейшими институтами и вузами России входит в тридцатку научных организаций России с наивысшим индексом цитирования работ их ученых.

Институт спектроскопии РАН стал в стране своего рода «центром кристаллизации» профессионалов в области оптики, спектроскопии, спектрального анализа и оптико-спектрального приборостроения независимо от их места работы. ИСАН явился организатором Всероссийской школы по спектральному анализу, которая объединила спектроскопистов-аналитиков НИИ, вузов и заводских лабораторий. Институт – бессменный организатор съездов по спектроскопии с участием иностранных ученых и специалистов (в 2005 г. прошел XXIII такой съезд), конференций и научных школ по различным разделам оптической спектроскопии (XVIII конференция по фундаментальной атомной спектроскопии состоялась 22-26 октября 2007 г.). ИСАН – организатор первых трех Троицких конференций «Медицинская физика и инновации в медицине» (2004, 2006 и 2008 гг.). Ученые Института не замыкаются в его стенах и широко привлекаются другими организациями к оппонированию диссертаций, проведению экспертиз, относящихся к области оптики и спектроскопии, к участию в комиссиях по научно-техническим вопросам, научных и диссертационных советах.

Общепризнанные научные достижения Института спектроскопии – результат профессионализма и высокой отдачи его ученых, а также усилий дирекции по организации научных работ, поддержанию инфраструктуры, подготовке кадров. Благодаря предпринятым мерам удалось сохранить работоспособный квалифицированный состав научных сотрудников и специалистов, действующее опытное экспериментальное производство, научную библиотеку (одну из лучших в РАН), столовую (единственную в городе), всю необходимую инфраструктуру, практически обновить весь парк лабораторного оборудования и компьютеров и даже привлечь в коллектив способную молодежь. При этом следует особо отметить, что Институт никогда не сдавал своих площадей в аренду коммерческим структурам – они нужны ему самому, особенно сейчас, в период возобновления интереса государственных структур к науке и инновациям.

Литература

1. А.Н.Рябцев, С.С.Чурилов, Э.Я.Кононов. Автоионизационные и высоковозбужденные состояния в спектре трехкратно ионизованного олова Sn IV. *Оптика и спектроскопия*, 2006, т.100, с.713-720.
2. С.С.Чурилов, А.Н.Рябцев. Анализ переходов $4p^6 4d^7 - (4p^6 4d^6 4f + 4p^5 4d^8)$ в восьмом спектре олова (Sn VIII). *Оптика и спектроскопия*, 2006, т.100, с.721-727.
3. С.С.Чурилов, А.Н.Рябцев. Анализ спектров In XII–XIV и Sn XIII–XV в далекой ВУФ область - *Оптика и спектроскопия*, 2006, т.101, с.181-190.
4. S.S.Churilov, A.N.Ryabtsev. Analyses of the Sn IX–Sn XII spectra in the EUV region. *Physica Scripta*, 2006, v.73, p.614-619.
5. I.Yu.Tolstikhina, S.S.Churilov, A.N.Ryabtsev, K.N.Koshelev. Atomic tin data. *In.EUV Sources for Lithography*, Ed. V.Bakshi, SPIE Press, Washington, USA, 2006, p.113-148.
6. K.N.Koshelev, H.-J.Kunze, R.Gayazov et.al. Radiative collapse in Z pinches. *In.EUV Sources for Lithography*, Ed. V.Bakshi, SPIE Press, Washington, USA, 2006, p.175-196.

7. V.V. Ivanov, P.S. Antsiferov, and K.N. Koshelev. Numerical simulation of the creation of a Hollow Neutral-Hydrogen Channel by an Electron Beam. *Phys.Rev.Letters* 2006, v.97, p.205007.
8. П.Н.Мелентьев, П.А. Борисов, С.Н. Руднев, А.Е. Афанасьев, В.И. Балыкин Фокусировка атомного пучка двумерной магнито–оптической ловушкой. *Письма в ЖЭТФ*, **83**, 16 (2006).
9. В.И. Балыкин, В.Г. Миногин, С.Н. Руднев Фокусировка атомного пучка ближнеполевой атомной микролинзой. *ЖЭТФ*, **130**, 784 (2006)
10. В.И. Балыкин, П.А. Борисов, В.С. Летохов, П.Н. Мелентьев, С.Н. Руднев, А.П. Черкун, А.П. Акименко, П.Ю. Апель, В.А. Скуратов Атомная «камера-обскура» с нанометровым разрешением. *Письма в ЖЭТФ*, **84**, 466–469, (2006)
11. V.I. Balykin, V.V. Klimov, V.S. Letokhov. Atom Nanooptics. In “*Handbook of Theoretical and Computational Nanotechnology*”, ed. by M. Reith and W. Schommers (Amer. Sci. Publ.), v.7, 1-78 (2006)
12. Aseyev S.A., Mironov B.N., Chekalin S.V., and Letokhov V.S. Femtosecond laser source of nanolocalized directed photoelectrons. *Appl. Phys. Lett.* **89** art. 112513 (2006).
13. Миронов Б.Н., Асеев С.А., Чекалин С.В., Летохов В.С. Генерация нанолокализованного, узконаправленного пучка фотоэлектронов с помощью фемтосекундных лазерных импульсов. *Письма ЖЭТФ* **83:(9)** стр. 435-438 (2006)
14. Миронов Б.Н., Асеев С.А., Чекалин С.В., Летохов В.С. Лазерная фемтосекундная фотоэмиссионная микроскопия капиллярных наноострий со сверхвысоким пространственным разрешением – *ЖЭТФ* **128(4)** стр. 732-739 (2005)
15. Асеев С.А., Миронов Б.Н., Чекалин С.В., Летохов В.С. Фотоэлектронная фемтосекундная лазерная проекционная микроскопия органических наноконплексов. *Письма ЖЭТФ* **80:(8)** стр. 645-649 (2004)
16. V. I. Balykin, “Atomic Nanoprobe with a Single Photon”, *JETP Lett.*, **78**, 408, 2003.
17. H. Oberst, Sh. Kasashima, F. Shimizu and V. I. Balykin, “A controllable diffraction grating for matter waves”, *Proc. of the XVI Intern. Conf. Laser Spectroscopy*, p. 253-255, 2003.
18. H. Oberst, Sh. Kasashima, V. I. Balykin, and F. Shimizu, “Atomic-matter-wave scanner”, *Phys. Rev.* **A68**, 013606, 2003.
19. A.G. Mal'shukov, C.S. Chu, Spin cloud induced around an elastic scatterer by the Spin-Hall effect. *Phys. Rev. Lett.* **97**, 076601, (2006).
20. A.G. Mal'shukov, L.Y. Wang, C.S. Chu, Spin-Hall interface resistance in terms of Landauer type spin dipoles, cond-mat/0610423. *Phys. Rev. B* **75**, 085315 (2007).
21. Скуридин С.Г., Дубинская В.А., Лагутина М.А., Компанец О.Н., Голубев В.Г., Ребров Л.Б., Быков В.А., Евдокимов Ю.М. Выявление генотоксикантов растительного происхождения при помощи биодатчиков пленочного типа. *Биомедицинские технологии и радиоэлектроника*, №3, 2006 г., с.38-43.
22. Гусев В.М., Кольяков С.Ф., Компанец О.Н., Павлов М.А., Евдокимов Ю.М., Скуридин С.Г.. Оптический биосенсор на основе портативного дихрометра с использованием биочипов на жидких кристаллах ДНК. *Альманах клинической медицины* – М.: МОНИКИ, т.ХII, с.119 (2006).
23. С.Г. Скуридин, В.А. Дубинская, О.Н. Компанец, Ю.М. Евдокимов. Новый тип биодатчиков для биотехнологии и медицины. *Альманах клинической медицины* – М.: МОНИКИ, т.ХII, с.131 (2006).
24. D.V. Serebryakov, A.P. Cherkun, B.A. Loginov, V.S. Letokhov. Tuning-fork-based fast highly sensitive surface-contact sensor for atomic force microscopy/near-field scanning optical microscopy. *Rev. Sci. Instr.*, **73(4)**, 1795 (2002).

25. A.P. Cherkun D.V. Serebryakov, S.K. Sekatskii, I.V. Morozov, V.S. Letokhov. Double- resonance probe for near-field scanning optical microscopy. *Rev. Sci. Instr.*, **77**(3): Art. No. 033703 Part 1 (2006).
26. Yu.G.Vainer, A.V. Naumov, M. Bauer, L. Kador. Dispersion of the local parameters of quasilocalized low-frequency vibrational modes in a low-temperature glass: Direct observation via single-molecule spectroscopy. *J. Chem. Phys.*, v. 122, No 24, pp. 244705 (6 pages) (2005).
27. A.V. Naumov, Yu.G.Vainer, M. Bauer, L. Kador. Applications of laser techniques for the study of dynamics of amorphous solids with high spatial resolution: single molecule spectroscopy. *OSA Trends in Optics and Photonics Series*, v. 98, p. WB11 (3 pages) (2005).
28. Yu.G. Vainer. Vibrational dynamics of glasses at low temperatures: Investigation by single-molecule spectroscopy. *J. Lumin.*, v. 125, No 1, pp. 279-286 (2007).
29. Yu.G. Vainer, A.V. Naumov, M. Bauer, L. Kador. Isotop effect in the linewidth distribution of single-molecule spectra in doped toluene at 2 K. *J. Lumin.*, v. 127, No 1, pp. 213-217 (2007).
30. Yu.G. Vainer, A.V. Naumov, M. Bauer, L. Kador, "Applications of laser techniques for the study of dynamics of amorphous solids with high spatial resolution: single molecule spectroscopy", *OSA Trends in Optics and Photonics Series*, v. 98, pp.WB11-WB13, (2006).
31. Fam Le Kien, V. I. Balykin, and K. Hakuta, „Light-induced force and torque on an atom outside a nanofiber”, *Phys. Rev. A***74**, 033412, 2006.
32. V.I. Balykin, V.V. Klimov, V.S.Letokhov. "Atom Nanooptics." In "Handbook of Theoretical and Computational Nanotechnology" 2006.
33. Fam Le Kien, V. I. Balykin, and K. Hakuta, „Angular momentum of light in an optical nanofiber”, *Phys. Rev. A*, 2006 (submitted).
34. Fam Le Kien, V. I. Balykin, and K. Hakuta, „Scattering of an evanescent light field by a single cesium atom near a nanofiber”, *Phys. Rev. A***73**, 013819, 2006.
35. Fam Le Kien, S. Dutta Gupta, V. I. Balykin, and K. Hakuta, "Spontaneous emission of a cesium atom near a nanofiber: Efficient coupling of light to guided modes", *Phys. Rev. A***72**, 032509, 2005.
36. Fam Le Kien, V. I. Balykin and K. Hakuta, „State-insensitive trapping and guiding of cesium atoms using a two-color evanescent field around a subwavelength-diameter fiber", *J. Phys. Soc. Jpn*, **74**, 910, 2005.
37. V.I. Balykin, Fam Le Kien, J. Q. Liang, M. Morinaga, and K. Hakuta, *CLEO/IQEC and PhAST Technical Digest on CD-ROM* (Optical Society of America, Washington, D.C. , 2004), presentation ITuA7.
38. Fam Le Kien, J.Q. Liang, K. Hakuta, and V.I. Balykin, "Field intensity distributions and polarization orientations in vacuum-clad subwavelength-diameter optical", *Opt, Commun.*, **242**, 445, 2004.
39. V. I. Balykin, K. Hakuta, Fam Le Kien, J. Q. Liang, and M. Morinaga, "Atom trapping and guiding with a subwavelength-diameter optical fiber", *Phys. Rev. A***70**, 011401(R), 2004.
40. Fam Le Kien, V. I. Balykin, and K. Hakuta „Atom trap and waveguide using a two-color evanescent light field around a subwavelength-diameter optical fiber", *Phys.Rev. A***70**, 063403 (2004).

Премии, медали и звания сотрудников Института

1977

- **С.Л.Мандельштам** Государственная премия СССР за цикл работ по рентгеновскому излучению Солнца.
- **С.Л.Мандельштам** Премия АН СССР имени академика Д.С.Рожественского за работы по спектроскопии высокоионизованных атомов.

1978

- **В.С.Летохов** Ленинская премия за работы по нелинейной лазерной спектроскопии.
- **Ю.А.Горохов, А.А.Макаров, А.А.Пурецкий, Е.А.Рябов, Н.П.Фурзиков** Премия Ленинского комсомола за работы по лазерному разделению изотопов.

1982

- **М.Р.Алиев** Премия АН СССР и Чехословацкой АН за цикл работ по теории колебательно-вращательных спектров нежестких молекул.

1985

- **В.Г.Колошников, Ю.А.Курицын** Государственная премия СССР за работы по диодной лазерной спектроскопии высокого разрешения.

1986

- **Е.И.Альшиц, Л.А.Быковская, Р.И.Персонов, Б.М.Харламов** Государственная премия СССР за работы по селективному лазерному возбуждению люминесценции замороженных растворов.
- **В.С.Летохов** Почетная Международная медаль в честь 600-летней годовщины основания Университета Гейдельберга (Германия).

1992

- **В.М.Агранович** Премия им. Александра фон Гумбольдта (Германия).

1993

- **В.М.Агранович** Премия им. П.Капицы (Англия).

1995

- **В.С.Летохов** Почетный доктор Университета Париж-Норд (Франция).

1996

- **Р.И.Персонов** Премия им. Александра фон Гумбольдта (Германия).

1997

- **В.М.Агранович** Премия имени академика Л.И.Мандельштама за теоретические исследования по спектроскопии поверхности.

1998

- **В.С.Летохов** Премия Европейского физического общества за исследования по взаимодействию лазерного излучения с веществом, включая атомную оптику, лазерное охлаждение атомов, лазерно-индуцированную химию и лазерные аналитические методы.

2001

- **В.С.Летохов, В.И.Балыкин, В.Г.Миногин** Премия Президиума РАН имени академика Д.С.Рожественского за цикл работ «Лазерное охлаждение и пленение атомов».

- **О.Н.Компанец** Золотая медаль и диплом 50-го Международного салона (выставки) изобретений и инноваций в науке и промышленности «Брюссель-Эврика-2001» (Бельгия).

2002

- **В.С.Летохов, Е.А.Рябов** Государственная премия Российской Федерации в области науки и техники за цикл работ "Физико-технические основы лазерного разделения изотопов методом селективной многофотонной диссоциации молекул".
- **Ю.Е.Лозовик** Премия Международной академической издательской компании "Наука-Интерпериодика" «За лучшую публикацию» в издаваемых ею журналах.

2003

- **В.С.Летохов** Благодарность Губернатора Московской области Б.В.Громова.
- **Г.Н.Макаров** Премия Международной академической издательской компании "Наука-Интерпериодика" «За лучшую публикацию» в издаваемых ею журналах.
- **О.Н.Компанец** Гран-при конкурса русских инноваций (отечественная премия).

2004

- **В.С.Летохов** Почетный доктор Лундского Университета (Швеция).
- **В.И.Балыкин** Премия им. Александра фон Гумбольдта (Германия).
- **Ю.Г.Вайнер** Премия Президиума РАН имени академика Д.С.Рожественского за работы по спектроскопии одиночных молекул.
- **А.В.Наумов** Медаль и премия Европейской Академии (Academia Europaea) для молодых ученых России.

2005

- **Коллектив ИСАН** Благодарность Губернатора Московской области за высокие достижения в производственной деятельности и большой вклад в развитие научно-промышленного комплекса Московской области.
- **В.М.Агранович** Почетный доктор Университета Блэза Паскаля (Клермонт-Ферранд, Франция).
- **А.В.Наумов** Медаль и премия Президиума РАН для молодых ученых России.

2008

- **Н.Н.Новикова** Медаль «Наставник будущих учителей» фонда «Династия».
- **Е.А.Виноградов** Почетный знак Губернатора Московской области.

Конференционные награды и конкурсы научных работ

2003

- **А.В.Потапов** Диплом первой степени победителя открытого конкурса на лучшую научно-техническую и инновационную работу по естественным наукам;
- **А.В.Потапов** Диплом победителя Всероссийского конкурса на лучшие научно-технические и инновационные работы студентов по естественным, техническим и гуманитарным наукам.

2004

- **А.В.Наумов** Премия Young Researcher Award of Wiley-VCH and Physica Status Solidi за лучшие работы, представленные на международной конференции "Phonons-2004";

- **А.В.Наумов** Приз International Society for Optical Engineers (SPIE) за лучший доклад на Высшей лазерной школе им. С.А.Ахманова.

2005

- **Н.М.Коротков** Лучший доклад на IV Международной молодежной конференции молодых ученых и специалистов «Оптика 2005»;
- **Е.А.Романов** Лучший доклад на IV Международной молодежной конференции молодых ученых и специалистов «Оптика 2005».

2007

- **П.Н.Мелентьев** Первая премия в открытом конкурсе работ молодых учёных РФ в области «физика и астрономия» некоммерческого фонда East–West Task Foundation;
- **П.Н.Мелентьев** Вторая премия в открытом конкурсе научных работ молодых учёных памяти академика А.П.Александрова в ГНЦ РФ ТРИНИТИ;
- **Ю.Г.Гладуш** Первая премия за лучший доклад молодого ученого на Международной конференции CEWQO-2007 (июнь, Палермо, Италия);
- **А.Е.Афанасьев** Диплом победителя конкурса научно-исследовательских работ студентов и аспирантов на конференции "Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук".

2008

- **А.В.Потапов** Первая премия в открытом конкурсе научных работ молодых учёных памяти академика А.П.Александрова в ГНЦ РФ ТРИНИТИ;
- **Т.Н.Станиславчук, К.Н.Болдырев** Вторая премия в открытом конкурсе научных работ молодых учёных памяти академика А.П. Александрова в ГНЦ РФ ТРИНИТИ;
- **Ю.Г.Гладуш** Вторая премия в открытом конкурсе научных работ памяти академика А.П.Александрова в ГНЦ РФ ТРИНИТИ.

Именные стипендии и гранты

2001

- **А.В.Наумов** Конкурсная программа поддержки молодых ученых РФФИ;
- **М.А.Кольченко** Конкурсная программа поддержки молодых ученых РФФИ.

2002

- **А.В.Наумов** Конкурсная программа поддержки молодых ученых РФФИ;
- **М.А.Кольченко** Конкурсная программа поддержки молодых ученых РФФИ.

2003

- **А.В.Наумов** Конкурсная программа поддержки молодых ученых РФФИ;
- **М.А.Кольченко** Конкурсная программа поддержки молодых ученых РФФИ.

2004

- **А.В.Наумов** Конкурсная программа Фонда содействия отечественной науке, номинация "Выдающиеся ученые. Кандидаты и доктора наук РАН".

2005

- **А.В.Наумов** Грант фонда INTAS (post-doctoral fellowship);
- **М.А.Кольченко** Грант фонда INTAS (post-doctoral fellowship);
- **А.В.Наумов** Конкурсная программа Фонда Содействия Отечественной Науке, номинация "Выдающиеся ученые. Кандидаты и доктора наук РАН";

- **В.А.Шарапов** Конкурсная программа Фонда Содействия Отечественной Науке, номинация "Лучшие аспиранты РАН";
- **А.В.Наумов** Грант Президента РФ для молодых ученых РФ и их научных руководителей.

2006

- **М.А.Кольченко** Грант фонда NWO (post-doctoral fellowship);
- **А.В.Наумов** Конкурсная программа Фонда Содействия Отечественной Науке, номинация "Выдающиеся ученые. Кандидаты и доктора наук РАН";
- **М.А.Кольченко** Конкурсная программа Фонда Содействия Отечественной Науке, номинация "Выдающиеся ученые. Кандидаты и доктора наук РАН";
- **А.В.Наумов** Грант Президента РФ для молодых ученых РФ и их научных руководителей;
- **М.А.Кольченко** Грант Президента РФ для молодых ученых РФ и их научных руководителей.

2007

- **А.В. Наумов** Грант фонда CRDF и Минобрнауки РФ (программа Basic Research and High Education);
- **П.Н. Мелентьев** Грант Президента РФ для молодых ученых РФ и их научных руководителей;
- **А.В. Наумов** Грант Президента РФ для молодых ученых РФ и их научных руководителей;
- **М.А. Кольченко** Грант Президента РФ для молодых ученых РФ и их научных руководителей;
- **А.В.Потапов** Конкурсная программа Фонда Содействия Отечественной Науке, номинация "Выдающиеся ученые. Кандидаты и доктора наук РАН";
- **А.В.Наумов** Конкурсная программа Фонда Содействия Отечественной Науке, номинация "Выдающиеся ученые. Кандидаты и доктора наук РАН";
- **М.А.Кольченко** Конкурсная программа Фонда Содействия Отечественной Науке, номинация "Выдающиеся ученые. Кандидаты и доктора наук РАН".

2008

- **А.В.Потапов** Конкурсная программа фонда DAAD (post-doctoral fellowship);
- **П.Н.Мелентьев** Грант Президента РФ для молодых ученых РФ и их научных руководителей;
- **А.В.Наумов** Грант Президента РФ для молодых ученых РФ и их научных руководителей;
- **Ю.Г.Гладуш** Конкурсная программа поддержки аспирантов и молодых ученых без степени фонда "Династия";
- **А.А.Соколик** Конкурсная программа поддержки аспирантов и молодых ученых без степени фонда "Династия";
- **П.Н.Мелентьев** Конкурсная программа Фонда Содействия Отечественной Науке, номинация "Выдающиеся ученые. Кандидаты и доктора наук РАН";
- **А.В.Потапов** Конкурсная программа Фонда Содействия Отечественной Науке, номинация "Выдающиеся ученые. Кандидаты и доктора наук РАН";
- **А.А.Соколик** Конкурсная программа Фонда Содействия Отечественной Науке, номинация "Лучшие аспиранты РАН".

Сотрудники Института – члены международных научных обществ

- **Виноградов Е.А.**

Европейская Академия наук (EAS-TECH)

- **Попова М.Н.**

Американское Физическое Общество (APS).

- **Чукалина Е.П.**

Американское Оптическое Общество (OSA).

- **Серебряная Н.Р.**

Международный Центр Дифракционных Данных (ICDD).

- **Летохов В.С.**

- Американское Оптическое общество (OSA);
- Общество им. Макса-Планка, ФРГ;
- Европейская Академия искусств и наук;
- Всемирный Инновационный Фонд;
- Европейская Академия наук.

- **Агранович В.М.**

- Американское Физическое Общество (APS);
- Физический Институт, Англия;
- Академия USA-Europe

ОТДЕЛ АТОМНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ



Отдел атомной спектроскопии был создан основателем Института членом-корреспондентом АН СССР профессором С.Л.Мандельштамом, который был его бессменным руководителем до ухода на пенсию в 1989 г. Отдел состоит из двух лабораторий — атомной спектроскопии (зав. лабораторией д.ф.-м.н. А.Н.Рябцев) и спектроскопии плазмы (зав. лабораторией к.ф.-м.н. К.Н.Кошелев). Научной задачей отдела является получение экспериментальных и теоретических данных об энергетических структурах атомов и ионов, необходимых для астрофизики, для работ по управляемому термоядерному синтезу, для создания вакуумных ультрафиолетовых (ВУФ) и рентгеновских лазеров, источников мощного ВУФ излучения, а также разработка спектральной диагностики высокотемпературной плазмы. В отделе работает 13 сотрудников, из них 4 доктора и 6 кандидатов наук.

Лаборатория атомной спектроскопии

Основы систематики спектров ионов легких элементов были заложены исследованиями шведского ученого Б.Эдлена в 30-40-х годах применительно к астрофизике. В 60-е годы внеатмосферные исследования Солнца и работы по управляемому термоядерному синтезу потребовали интерпретации коротковолновых спектров плазмы, содержащей многократные ионы. Ни табличные данные, ни уровень теоретических расчетов не обеспечивали этого из-за принципиальных особенностей таких спектров — новых линий-спутников, а также большого вклада в энергии уровней релятивистских эффектов и взаимодействия конфигураций в электронных оболочках ионов. Лаборатория атомной спектроскопии под руководством Э.Я.Кононова была создана при основании Института для проведения систематических исследований по изучению ионов высоких кратностей и развитию расчетных методов. Работа лаборатории внесла основной вклад в создание в России нового научного направления.



Рис.1. ВУФ-спектрограф высокого разрешения нормального падения излучения.

В первые годы основное внимание уделялось созданию и развитию спектральных приборов высокого разрешения в вакуумной ультрафиолетовой и рентгеновской областях спектра, источников для возбуждения высокоионизованных атомов и систем обработки спектров. Для работы в области 30-250 нм создан вакуумный спектрограф нормального падения излучения с дифракционной решеткой 1200 штр/мм радиуса 6.65 м (Э.Я.Кононов, А.Н.Рябцев, В.И.Ковалев). Модернизирован и оснащен решеткой 3600 штр/мм радиуса 3 м спектрограф скользящего падения

излучения ДФС-26 (угол падения излучения 85°) с рабочей областью 5-35 нм (А.Н.Рябцев, Э.Я.Кононов). Для более коротковолновой области были

разработаны спектрографы с изогнутыми кристаллами в качестве диспергирующих элементов, построенные по различным оптическим схемам (Е.В.Аглицкий, Ю.В.Сидельников). В целом был создан постоянно модернизируемый уникальный комплекс спектрографов, позволяющий проводить регистрацию спектров с практически предельно возможным высоким разрешением в области 250-0.1 нм, от ультрафиолетовой до рентгеновской области спектра.

Построен неодимовый лазер мощностью 1 ГВт (энергия 10 Дж при длительности импульса 10 нс) для получения высокотемпературной плазмы, возникающей при фокусировке лазерного излучения в вакууме на поверхности твердой мишени (С.С.Чурилов, Э.Я.Кононов). Создана оригинальная конструкция малоиндуктивной вакуумной искры, имеющей в горячей области температуру в десятки миллионов градусов, превышающую температуру солнечных вспышек (Ю.В.Сидельников, Е.В.Аглицкий).

Разработан и построен полуавтоматический компаратор-микрофотометр, позволивший в значительной степени автоматизировать процесс измерения спектральных линий на фотоспектрограммах, повысить точность измерений и перевести обработку измерений на ЭВМ (В.И.Ковалев, Э.Я.Кононов). В 1991 г. введена в строй система автоматической обработки фотоспектрограмм на базе сканирующего микрофотометра (В.И.Азаров).

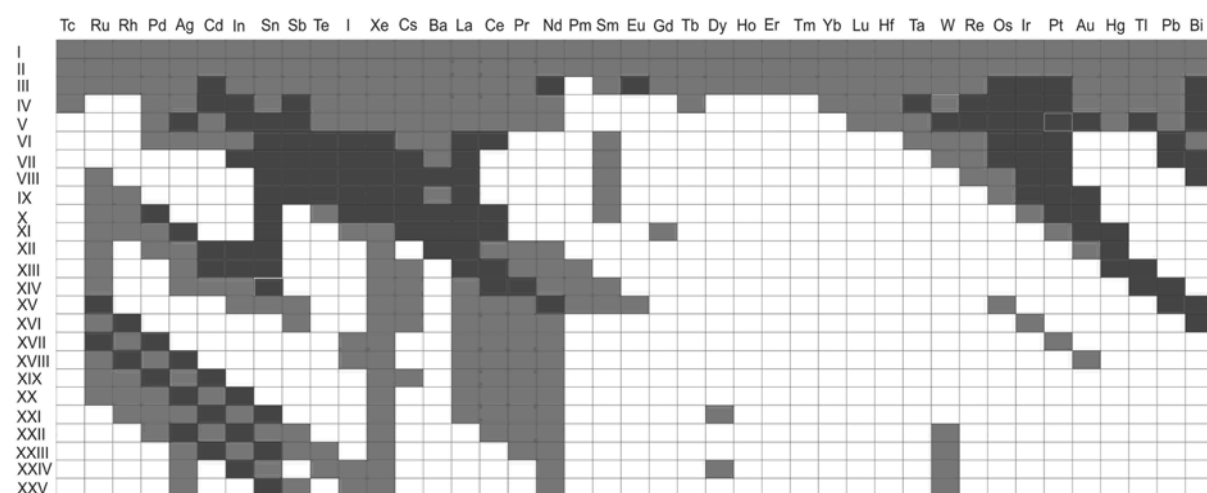
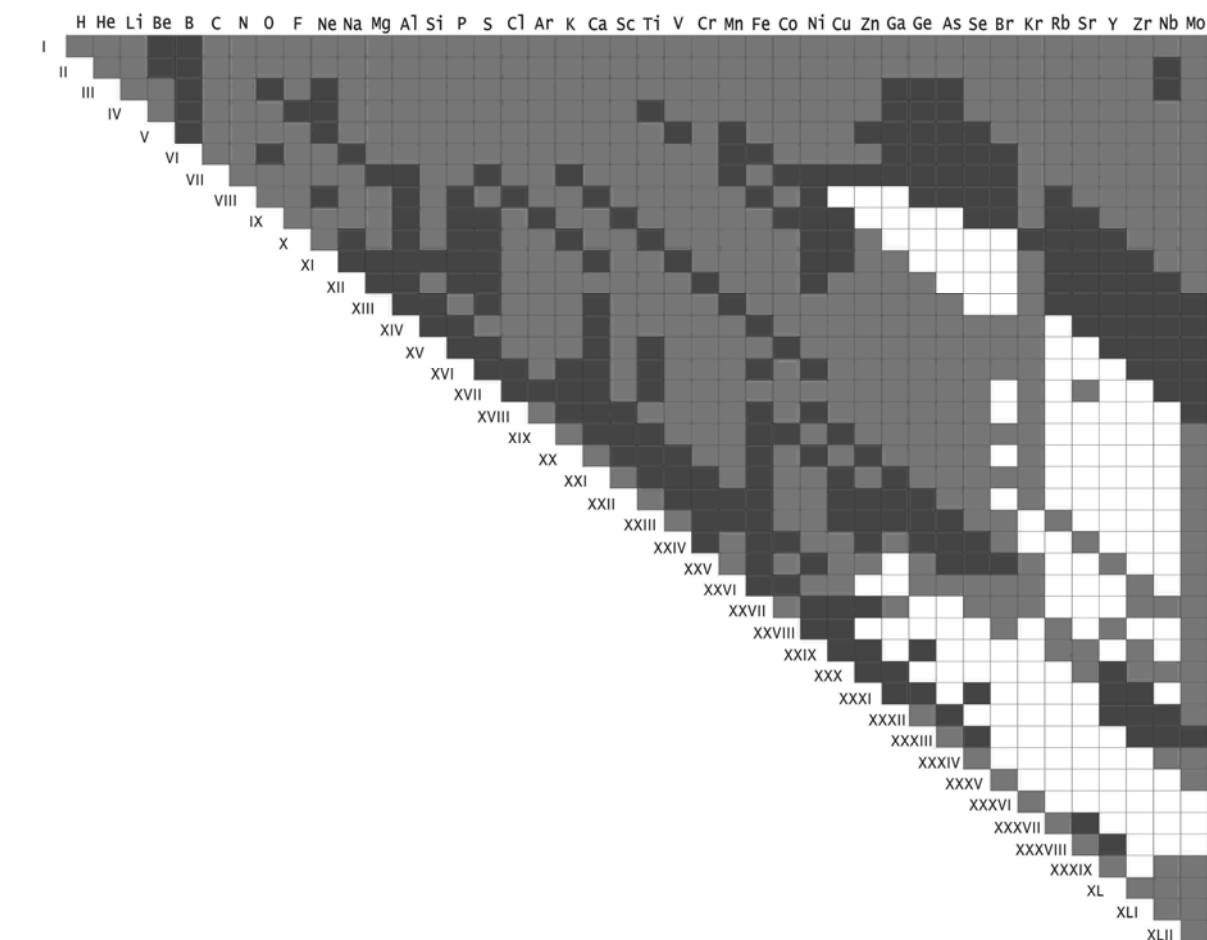
Результаты систематических исследований ионных спектров в общем виде очерчены в таблице. Таблица иллюстрирует изученность спектров атомов и ионов по состоянию на конец 2007 г. Каждая клеточка соответствует определенному иону; если спектр иона в той или иной мере исследовался — клеточка серая. Темными клеточками показаны ионы, в изучение которых внесли вклад работы данной лаборатории.

Объектами исследования в зависимости от потребностей являлись как относительно простые спектры, состоящие из десятка линий, так и весьма сложные спектры, содержащие тысячи спектральных линий.

В рентгеновской области спектра с помощью лазерной плазмы изучены ионы, в которых осталось несколько электронов: резонансные серии в водородо- и гелиеподобных ионах легких элементов (Е.В.Аглицкий совместно с ФИАН). Далее эти работы были продолжены с использованием малоиндуктивной вакуумной искры, с которой удалось продвинуться в последовательности водородоподобных ионов до Ga XXXI, гелиеподобных ионов до Y XXXVIII, неоноподобных — Pr L (С.Л.Мандельштам, Е.В.Аглицкий, П.С.Анциферов, А.М.Панин) [1]. Важной, а иногда и доминирующей особенностью рентгеновских спектров высокозарядных ионов являются так называемые сателлиты спектральных линий. Их подробное изучение заложило основу методов определения электронной температуры и плотности в горячей плазме (К.Н.Кошелев, Ю.В.Сидельников и др.) и логически привело к организации лаборатории спектроскопии плазмы.

Другим большим классом исследованных объектов являются ионы элементов от алюминия до мышьяка, содержащие заполняющуюся оболочку $n=2$ (Э.Я.Кононов, А.Н.Рябцев и др.). В регистрации переходов $n=2-n'=2$, расположенных в вакуумной ультрафиолетовой области, как в случае ряда упомянутых выше рентгеновских спектров, были достигнуты для своего времени рекордные кратности ионизации. В сочетании с теоретическими расчетами достигнуто полное понимание энергетической структуры внешней L-оболочки многократно ионизованных атомов с зарядами ядра $Z=10-100$ [2].

Таблица изученности спектров ионов периодической системы по состоянию на 2007 г.



□ - спектр неизвестен ■ - спектр известен ■ - изучено в ИСАНе

Выполнен анализ большого числа спектров ионов протяженных изоэлектронных последовательностей меди, никеля, кобальта и железа, содержащих 3d-электроны во внешних оболочках. Исследованы закономерности в поведении уровней вдоль изоэлектронных последовательностей, что позволило разработать надежную методику предсказания и анализа таких спектров, включая случаи пересечения взаимодействующих конфигураций (А.Н.Рябцев, Л.И.Подобедова) [3]. Найден путь для исследования автоионизационных состояний в ионах умеренной кратности ионизации. Впервые для таких ионов в Ga III-Br VII измерены их энергии и ширины (А.Н.Рябцев) [4]. Позднее были найдены и измерены автоионизационные состояния в ионах не высокой кратности ионизации более тяжелых элементов: In, Sn, Sb, Te, I и Bi [5,6].

Экспериментальное изучение спектров в настоящее время все более сдвигается в сторону ионов тяжелых элементов. Это вызвано как фундаментальным интересом к исследованию возрастающих в тяжелых элементах корреляционных и релятивистских эффектов, так и практическими потребностями по созданию мощных источников излучения для нанолитографии, астрофизики в связи с интерпретацией спектров химически особенных звезд, полученных, в частности, с помощью Hubble Space Telescope, а также физики рентгеновских лазеров.

В совместном (Университет г.Антигониш, Канада; Амстердамский университет, Нидерланды; Медонская обсерватория и Лаборатория им. Эме Коттон, Франция) проекте [7,8] изучены спектры ионов от второй до двенадцатой кратности ионизации элементов платиновой группы (Re, Os, Ir, Pt, Au, Hg), которые были полностью неизвестны. Эту задачу удалось успешно решить благодаря развитому в лаборатории методу автоматизированной идентификации сложных спектров [9], а также параллельно развиваемому в Амстердамском университете новому методу расчета сложных атомных спектров на базисе ортогональных операторов. В результате получены не только новые спектроскопические атомные данные, но и впервые в тяжелых атомах - количественные данные о корреляционных эффектах и релятивистских взаимодействиях более высоких порядков, чем обычные спин - орбитальные взаимодействия.

Также совместно с Медонской обсерваторией и Лабораторией им. Эме Коттон (Франция) проведено изучение ионов от Sb VI до Nd XV изоэлектронной последовательности палладия для обеспечения работ по созданию рентгеновских лазеров [10]. Успех этой работы основан на сочетании высокого качества спектров высокого разрешения, полученных в ИСАНе на спектрографе с решеткой 6.65 м от плазмы, создаваемой 1-ГВт неодимовым лазером, и французских расчетов методом обобщенных наименьших квадратов, в котором в рамках общих закономерностей рассчитываются одновременно спектры на протяженной изоэлектронной последовательности от Cd III до Nd XV. Во всех ионах найдены и точно измерены спектральные линии, на которых возможно создание лазерной генерации в вакуумном ультрафиолете. Полученные атомные данные (уровни энергии, длины волн и вероятности переходов) являются базисом для достижения лазерной генерации на палладиеподобных ионах до ~ 24 нм.

Основным направлением исследований лаборатории в последние 5 лет являлось обеспечение фундаментальными атомными данными работы по созданию источника излучения в коротковолновой УФ области спектра, а также изучение спектров ионов, содержащих в электронных оболочках 4f-электроны, с приложением к анализу спектров химически особенных звезд.

Для активно развиваемой в настоящее время проекционной оптической литографии нового поколения необходимы спектроскопические данные о

веществе, которое могло бы использоваться для создания мощных источников излучения в вакуумной УФ области спектра. Одним из наиболее перспективных типов литографических ВУФ источников на длине волны 135 Å является высоко-

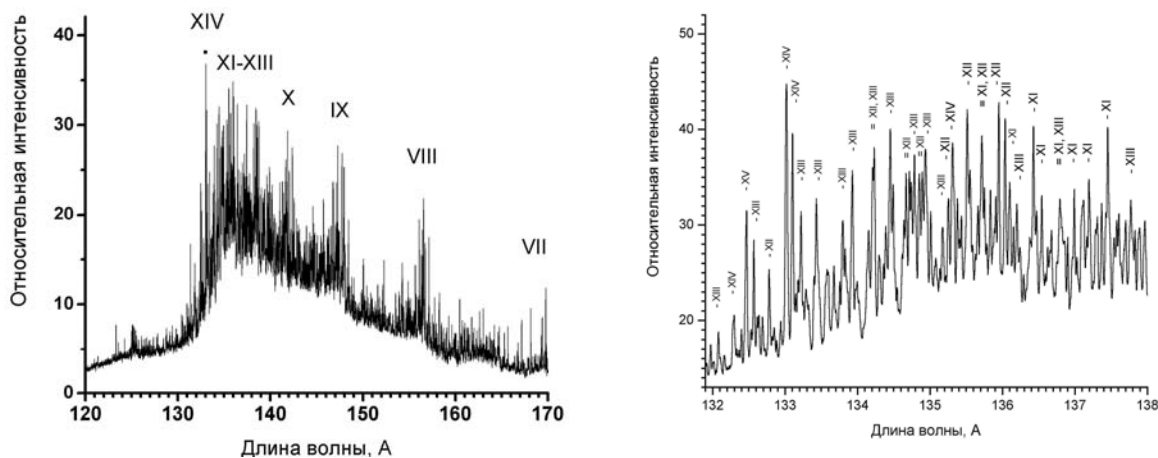


Рис. 2. Спектр олова в области 120-170Å, возбуждаемый в вакуумной искре с током 25 кА и его идентификация в области 135±3 Å.

температурная плазма, содержащая ионы олова. Такая плазма дает очень интенсивный пик излучения в узкой спектральной области 132-148 Å, состоящий из резонансных переходов в спектрах нескольких ионов с заполняющейся 4d оболочкой (от Sn VIII до Sn XIV), что предопределяет высокую эффективность преобразования подводимой энергии в полезное излучение (рис.2). Тем не менее, спектры ионов олова в этой области до сих пор оставались практически не изученными.

В результате наших исследований впервые классифицировано около 550 линий в спектрах от Sn IV до Sn XIV, в том числе все интенсивные линии в спектрах ионов олова, возбуждаемые в области 130-150 Å. Установлено, что подавляющее большинство линий в реально используемом для оптической литографии 2-% интервале вблизи 135 Å принадлежит резонансным переходам в спектрах Sn XII и Sn XIII. В изученных ионах определены энергии около 300 уровней.

Результаты этой идентификации были достаточными для разработки диагностики высокотемпературной плазмы олова и первых ее приложений к оптимизации работы источника на основе вакуумной искры для получения максимального выхода излучения в области 13.5 нм. Однако они не вполне соответствуют строгим критериям, предъявляемым к фундаментальным спектроскопическим данным. Идентификация таких сложных переходов должна быть подтверждена сравнением со спектрами аналогичных переходов в изоэлектронных ионах соседних более легких элементов, которые до сих пор не известны. Спектры элементов от индия до палладия получены (рис. 3) и анализируются. Это более длительная работа, результатом которой будет не только уточнение спектров олова, но и большой объем фундаментальных атомных данных для указанных ионов, анализ которых прояснит влияние на спектры ионов с заполняющейся 4d-оболочкой корреляционных и релятивистских эффектов.

Современные астрономические наблюдения дают богатый материал по звездным спектрам. Спектры химически особенных звезд в видимой области богаты линиями одно- и двукратно ионизованных атомов редкоземельных элементов. Редкоземельные элементы содержат заполняющуюся 4f-оболочку, поэтому их спектры содержат тысячи спектральных линий. Однако количество

экспериментально известных переходов, в частности, в двукратно ионизованных атомах имеет порядок сотни. В последние 5 лет в ИСАНе начала развиваться программа по исследованию таких спектров на основе опыта, полученного при работе с ионами с заполняющимися d-оболочками. Внесен вклад в лабораторные данные по спектрам Pr III, Nd III и Eu III. В каждом спектре выполнены новые классификации линий и проведены расчеты вероятностей переходов. В частности, в Eu III идентифицированы 93 новые линии и найдено 39 новых уровней. Список рассчитанных переходов между известными уровнями Eu III

содержит более 1100 линий, а между всеми уровнями ниже ~ 11 эВ - ~ 23000 . В Институте астрономии РАН эти данные используются для интерпретации спектров химически особенных звезд. Пример согласия расчетного (с нашими данными для Pr III и Nd III) и измеренного спектра звезды Ar HD 144897 приведен на рис.4. Измеренные и рассчитанные данные позволяют проводить надежные измерения распространенности редкоземельных элементов в звездах, а также изучать тонкие эффекты в формировании спектров звезд, такие как отклонения от термодинамического равновесия

Всего за 40 лет экспериментально изучены спектры около 290 ионов, идентифицировано более 30500 спектральных линий.

Создан и регулярно обновляется банк библиографии по атомным спектрам. К нему организован свободный доступ через Интернет по адресу <http://das101.isan.troitsk.ru/> (А.Е.Крамида, Г.В.Веденеева).

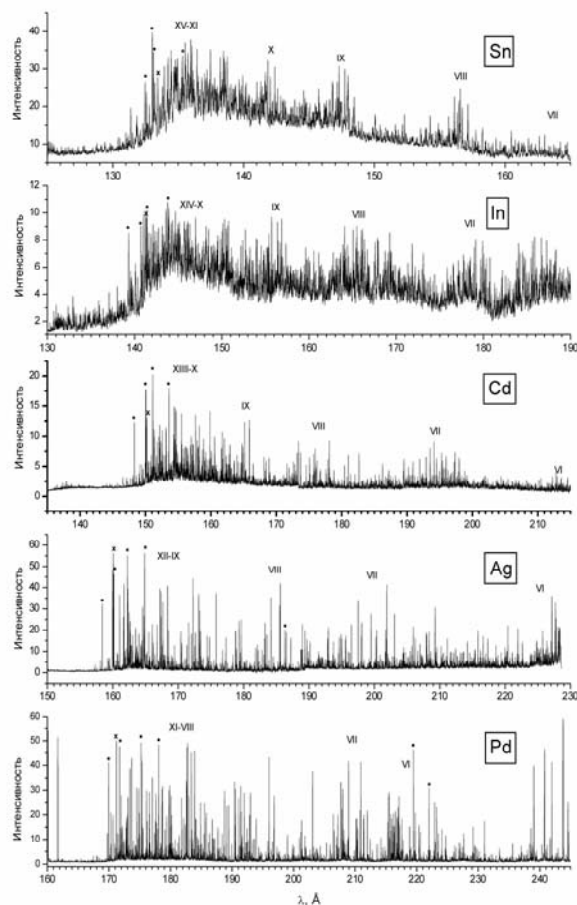


Рис.3. Спектры In, Cd, Ag и Pd, изоэлектронные с Sn VIII - Sn XV.

Одновременно развивались методы теоретических расчетов спектров. При отождествлении переходов в водородо- и гелиеподобных ионах, сателлитных к ним переходов, а также переходов между конфигурациями заполняющейся оболочки $n=2$, решающее значение имело создание и развитие метода, позволяющего представить вклад электрон-электронных взаимодействий в разложения по $1/Z$ (У.И.Сафронова совместно с ФИАН).

Для анализа вкладов различных поправок, получаемых методом теории

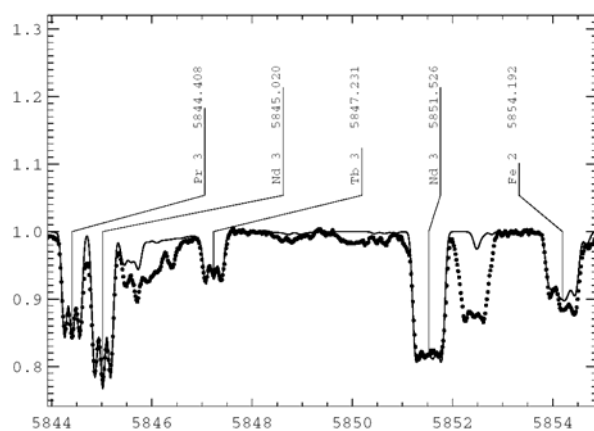


Рис.4. Участок спектра звезды Ar HD 144897. Точки - экспериментальные данные, сплошная линия - расчетный спектр.

возмущений, оказалось существенным использование полевой формы теории возмущений, получившей заметное развитие в этих работах [15]. На развитие этих работ в последние годы оказали влияние исследования фундаментальных свойств $1/Z$ -разложения: области и скорости его сходимости (И.А.Иванов совместно с Медонской обсерваторией, Франция). Полученные данные о структуре ряда теории возмущений по $1/Z$ привели к разработке эффективного алгоритма аппроксимации высших порядков теории возмущений, позволяющего получать более точные значения спектроскопических величин.

С начала 80-х годов Л.Н.Ивановым и Е.П.Ивановой развивался оригинальный метод прецизионного расчета атомных структур. В основе метода — энергетический подход последовательной квантово-электродинамической теории. Он получил известность как релятивистский метод теории возмущений с модельным нулевым приближением. С его помощью были рассчитаны уровни энергии многих изоэлектронных последовательностей, ридберговские состояния и состояния отрицательных ионов некоторых редкоземельных элементов, исследованы кооперативные электрон-ядерные процессы, исследованы квантово-электродинамические эффекты в многозарядных ионах. Метод зарекомендовал себя как один из самых надежных и точных в расчетах атомных констант.

В последние годы этот метод используется для моделирования спектров излучения ионов в плазме, для исследования физических характеристик излучения и определения оптимальных условий для наблюдения лазерного эффекта в ВУФ и мягкой рентгеновской области в лазерной плазме и плазме капиллярного разряда, создания мощных источников ВУФ излучения [16].

В развитие экспериментальных работ по изучению возможностей в создании ВУФ лазеров на палладиоподобных ионах выполнены расчеты спектроскопических констант, кинетики заселения уровней и коэффициентов усиления спонтанного излучения в Pd-подобных $\text{Er XXIII} - \text{Re XXX}$. Длины волн переходов, на которых возможно усиление, находятся в области 10-15 нм. Расчеты выполнены для условий ультракороткого импульса накачки. Для каждого иона определены оптимальные условия в плазме для наблюдения узконаправленного, монохроматического, интенсивного излучения (несколько процентов от энергии импульса накачки) на длине волны лазерного перехода [17].

На основе всех разрабатываемых теоретических методов созданы алгоритмы и универсальные программы для ЭВМ.

Литература

1. Спектроскопия многозарядных ионов в горячей плазме. - ред. Сафронова У.И., М.: Наука, 1991.
2. Кононов Э.Я., Сафронова У.И. Энергетическая структура и систематика электронов внешней L - оболочки многократно ионизованных атомов для $Z = 10-100$. - Оптика и спектр., 1977, т.43, №1, с.3-9.
3. Рябцев А.Н. Проявления взаимодействия конфигураций в атомных спектрах. - Изв. АН СССР сер.физ., 1986, т.50, №7, с.1434-1441.
4. Ryabtsev A.N. Autoionizing states in moderately charged ions. - Nucl.Inst.Meth.Phys.Res.B, 1988, v.31, No.1&2, p.196-205.
5. Рябцев А.Н., Чурилов С.С., Джоши Й.Н. Анализ переходов с автоионизационных состояний ионов Bi III, Bi IV и Bi V. - Оптика и спектр., 2000, т.88, №3, с.360-365.
6. Рябцев А.Н., Чурилов С.С., Кононов Э.Я. Конфигурация $4d^9 5p^2$ в спектрах In III - Te VI. - Оптика и спектр., 2007, т.102, №3, с.400-408.

7. Ryabtsev A.N., Azarov V.I., Churilov S.S., Kildiyarova R.R., Ryabtsev A.N., Raassen A.J.J., Uylings P.H.M., Joshi Y.N., Tchang-Brillet L., Wyart J.-F. The Platinum Group Ion Project. - NIST Special Publ.926, 1998, p.103-105.
8. Ryabtsev A.N. Spectroscopy of ions with 5d electrons in the ground state. - УФН, 1999, т.169, №3, с.350-351.
9. Azarov V.I. Formal approach to the solution of the complex-spectra identification problem. 2. Implementaton. Phys.Scripta, 1993, v.48, No.6, p.656-667.
10. Churilov S.S., Ryabtsev A.N., Brillet Wan-U.L., Wyart J.-F. Spectroscopy of Pd-like ions. - Phys.Scripta T, 2002, v.100, p.98-103.
11. I.Yu.Tolstikhina, S.S.Churilov, A.N.Ryabtsev, K.N.Koshelev. Atomic tin data.- In.EUV Sources for Lithography, Ed. V.Bakshi , SPIE Press, Washington, USA, 2006, p.113-148.
12. С.С.Чурилов, А.Н.Рябцев. Анализ спектров In XII--XIV и Sn XIII--XV в далекой ВУФ области. - Оптика и спектроскопия, 2006, т.101, с.181-190.
13. S.S.Churilov, A.N.Ryabtsev. Analyses of the Sn IX–Sn XII spectra in the EUV region. - Physica Scripta, 2006, v.73, p.614-619.
14. T.Ryabchikova, A.Ryabtsev, O.Kochukhov, S.Bagnulo. Rare-earth elements in the atmosphere of the magnetic chemically peculiar star HD 144897. New classification of the Nd III spectrum. - A&A 2006, v.456, p.329-338.
15. Браун М.А., Гурчумелия А.Д., Сафронова У.И. Релятивистская теория атомов, М., Наука, 1984.
16. Е.П.Иванова, А.Л.Иванов. Супермощный источник монохроматического излучения в области дальнего ультрафиолета. - ЖЭТФ 2005, т.127, №5, с.957.
17. E.P.Ivanova, A.L.Ivanov, T.E.Pakhomova. X-Ray Laser at 10-15 nm in Pd - like Ions Er XXIII - Re XXX. - in X-Ray Lasers 2006, Eds.P.V.Nickles and K.A.Janulewicz, Springer (2007), p.353-359.



Лаборатория спектроскопии плазмы

Основное направление исследований лаборатории (зав. лабораторией – К.Н.Кошелев) - ВУФ- и рентгеновская спектроскопия высокотемпературной плазмы электрических разрядов. Ниже мы приведем краткий исторический обзор научных направлений, разрабатывавшихся в лаборатории, а также несколько более подробное описание современного состояния исследований.

Краткий обзор истории лаборатории. Физика микропинчей.

В первые годы существования лаборатории был выполнен цикл теоретических и экспериментальных исследований так называемых «плазменных точек» (ПТ). ПТ - это объект в столбе аксиально-симметричных разрядов, обладающий высокой температурой, высокой плотностью и излучающий в рентгеновской области спектра. Первые эксперименты были выполнены с установкой «малоиндуктивная вакуумная искра», созданной Ю.В.Сидельниковым и Э.Я.Гольцем по предложению С.Л.Мандельштама и руководителя лаборатории атомной спектроскопии Э.Я.Кононова [1].

Применение экспериментальных методов регистрации рентгеновских спектров многозарядных ионов с наилучшим на то время спектральным разрешением позволило исследовать параметры плазмы ПТ (К.Н.Кошелев, Ю.В.Сидельников, П.С.Анциферов, А.Е.Крамида и др.) [2]. Было обнаружено, что ПТ - это плазменные объекты с уникальными параметрами, их температура превышает 10 миллионов градусов, а время существования лежит в субнаносекундной области. Эти исследования позволили объяснить свойства ПТ и привели к созданию модели «радиационного коллапса» плазмы аксиальных разрядов, содержащей ионы тяжелых элементов (К.Кошелев, В.Вихрев, В.Иванов) [3]. Модель описывает возникновение ПТ как результат развития $m=0$ неустойчивости в условиях сильных радиационных потерь вследствие линейчатого излучения ионов.

Было показано, что «радиационный коллапс» является общим явлением для многих сильноточных разрядов с аксиальной симметрией. В 1988 году была построена мощная установка типа Z-пинч с импульсным напуском газа «МП-100», которая применялась для исследований ПТ с разрядным током свыше 1 МА (Ю.В.Сидельников, П.С.Анциферов, А.А.Палкин) [4]. Эта установка позволила получить большое количество важных результатов по динамике сжатия пинча и развитию микропинчей - ПТ (Л.А.Дорохин, Ю.В.Сопкин). В частности, было зарегистрировано излучение He-подобного Хе в диапазоне 0.6 А, это был ион с максимальным потенциалом ионизации, зарегистрированный в лабораторной плазме.

Эксперименты, выполненные в сотрудничестве с Сухумским физико-техническим институтом выявили режим «радиационного коллапса» с появлением микропинчей на установке «плазменный фокус» (Ю.В.Сидельников, П.С.Анциферов) [5]. Эти работы были продолжены в сотрудничестве с Дюссельдорфским Университетом на уникальном быстром «плазменном фокусе» SPEED-2, а также на разрядных установках в Штуттгартском Университете. Они сформировали экспериментальную базу для создания импульсных источников

рентгеновского и нейтронного излучения с использованием разрядов типа «плазменный фокус» во многих лабораториях.

В настоящее время исследования по физике «радиационного сжатия» нашли важное практическое применение при создании источника коротковолнового излучения для нового поколения литографии – «литографии экстремального ультрафиолета» (см. ниже более подробно).

Рентгеновские линии свободных атомов

В лаборатории велось изучение рентгеновских спектров ($\lambda \leq 10 \text{ \AA}$) ионов с использованием электронного пучка для их получения и возбуждения (П.С.Анциферов). Исследования рентгеновских характеристических линий (РХЛ), излучаемых свободными атомами привели к измерению сдвигов таких РХЛ по отношению к их положению в случае излучения твердым телом. Такие данные представляют интерес для метрологических целей, они также интересны для расчетов зонной структуры твердого тела и энергетической структуры рентгеновских термов свободных атомов [7].

Рентгеновский лазер

В 1976 в году в ИСАНе впервые была предложена схема получения усиления в ВУФ области с использованием Ne-подобных ионов (А.Н.Жерихин, К.Н. Кошелев, В.С.Летохов) [8]. Она была впервые реализована в Ливерморской Национальной лаборатории и сейчас широко используется для получения усиления в коротковолновом диапазоне. Первая демонстрация возможности инверсии на переходах в Li-подобных ионах в рекомбинационном режиме также была проведена в ИСАНе (Э.Я.Кононов, К.Н.Кошелев, С.С.Чурилов).

Несколько лет назад лаборатория вернулась к проблеме развития источников когерентного излучения в коротковолновом диапазоне спектра. Лазерный эффект на 3s–3p переходах в Ne-подобных ионах аргона на длине волны 46.8 нм был продемонстрирован в капиллярном разряде (Анциферов П., Дорохин Л., Назаренко А. и Кошелев К. Это было первое наблюдение ВУФ лазерного эффекта, сделанное в России [9].

Возможность инверсной заселенности в многозарядных ионах и стимулированного излучения в ВУФ области вследствие перезарядки ионов пучков плазмы, генерируемых пинчами, на атомах газовой мишени была предсказана теоретически (К.Кошелев, Г. Кунце) [10], и продемонстрирована экспериментально в сильноточных Z-пинчах, а также в разрядах типа «плазменный фокус» (Л.Дорохин, Ю.Сидельников совместно с институтом Фраунгофера лазерных технологий в Аахене, Германия). Лаборатория участвовала в Программе Европейского сообщества «FACADIX» по изучению возможностей использования плазмы капиллярных разрядов для получения стимулированного излучения в ВУФ спектральном диапазоне. В течение последних нескольких лет в лаборатории исследуется новый подход - создание «стимулированных» неустойчивостей в плазме капиллярного разряда (Анциферов, Дорохин, Назаренко).

Литература

1. Гольц Э.Я., Житник И.А., Кононов Э.Я., Мандельштам С.Л., Сидельников Ю.В., Лабораторное воспроизведение спектра рентгеновской вспышки на солнце. - ДАН СССР, сер.мат.физ., 1975, т.220, №3, стр.560-563.

2. Kononov E.Ya., Koshelev K.N., Sidelnikov Yu.V., X-ray spectroscopic study of micropinches in a low-inductance vacuum spark. - Sov. J. Plasma Phys., 1985, v.11, N8, p.538-543.
3. Вихрев В.В., Иванов В.В., Кошелев К.Н., Формирование и развитие микропинчевой области в вакуумной искре. - Физика плазмы, 1982, т.8, №6, стр.1211-1219.
4. Golts E.Ya., Koloshnikov G.V., Koshelev K.N., Kramida A.E., Sidelnikov Yu. V., Vikhrev V.V., Ivanov V.V., Palkin A.A., Prut V.V., A high temperature micropinch in a discharge with a current of 1 MA. - Phys.Lett.A, 1986, v.115, N3, p.114-116.
5. Koshelev K.N., Krauz V.I., Reshetniak N.G., Salukvadze R.G., Ssidelnikov Yu.V., Khautiev E.Yu., Formation of micropinch structures in plasma-focus discharges with admixtures of heavy atoms, - Sov. J. Plasma Phys, 1989, v.15, N9, p.619 – 624.
6. Rosmej F.B., Schulz A., Koshelev K.N., Kunze H.-J., Asymmetric repumping of the Lyman-alpha components of hydrogenlike ions in a dense expanding plasma, - JQSRT, 1990, v.44, N 5, p.559-566.
7. Antsiferov P.S., The characteristic X-ray spectra of free atoms of metals, - Central European Journal of Physics, 2003, v.2, p.268-288.
8. Жерихин А.Н., Кошелев К.Н., Летохов В.С., Об усилении в рентгеновской области на переходах в многозарядных ионах - Квант. электр., 1976, т.3, №1, стр. 152-156.
9. Koshelev K.N., Antsiferov P.S., Dorokhin L.A., Nazarenko A.V., Sidelnikov Yu. V., Glushklov D.A., Observation of ASE effect for Ne-like Ar in a capillary discharge driven by inductive storage with plasma erosion opening switch - J. Physique IV, 2001, v.64, p.292-294.
10. Кошелев К.Н., Кунце Х.И., Инверсная заселенность в разрядной плазме с неустойчивостями типа перетяжки, - Квант. Электр., 1997, т.24, №2, стр.169-172.

**ЛСП сегодня. Работы по созданию источников
коротковолнового излучения для нового поколения литографии.
(совместно с Лабораторией молекулярной спектроскопии высокого
разрешения и аналитической спектроскопии)**

Среди внушительного списка научных, технических и технологических проблем, которые предстоит решить при создании коротковолновой литографии, далеко не последнее место по сложности возникающих задач занимает источник излучения. Длина волны для нового поколения литографии – EUV литографии - 13,5 нм была выбрана задолго до того, как стало более или менее понятно, как именно может быть устроен источник обеспечивающий коммерчески выгодное производство – HVM (High Volume Manufacturing).

Плазма, излучающая в далеком вакуумном ультрафиолете (ВУФ) – давно и хорошо изученный объект, однако технические требования, предъявляемые к HVM источнику, настолько необычны, что казалось бы простая задача нагрева плазмы до температуры в несколько десятков электрон-вольт превращается в целый комплекс сложных физических и инженерно-технических проблем. Эффективный размер излучающей области не должен превышать 1 мм³; рабочая частота источника свыше 50 кГц и стабильность дозы излучения 3σ (за 50 вспышек) ≤ 0,3 %. Оценки показывают, что в промышленный вариант источника будет иметь полную мощность (электрическую или световую) не ниже 100 кВт.

С точки зрения фундаментальной атомной спектроскопии олово представляет собой наиболее оптимальное рабочее вещество для источника излучения на длине волны 13.5 нм. Резонансными переходами в ионах Sn⁺⁸ - Sn⁺¹³ являются 4d^k - (4d^{k-1}4f + 4p⁵4d^{k+1}). Большая величина обменного

взаимодействия $4d-4f$ в конфигурации $4d^{k-1}4f$ и $4p - 4d$ в $4p^54d^{k+1}$ приводит к разделению уровней энергии этих конфигураций на две зоны, причем вероятности переходов из верхней зоны намного превосходят вероятности переходов из нижней зоны. Сильное взаимодействие между конфигурациями $4d^{k-1}4f$ и $4p^54d^{k+1}$ приводит к еще большему сужению этой излучательной зоны. В результате, не смотря на наличие многих сотен уровней в широком интервале энергии, излучение концентрируется в узком спектральном интервале. Кроме того, из-за малой зависимости энергии возбуждения при $n=4 \rightarrow n'=4$ переходах в этот интервал попадают интенсивные переходы в нескольких соседних ионах.

Два основных типа источников излучения рассматриваются – разрядная плазма (РП) и плазма, возникающая при фокусировке лазерного излучения на мишени – лазерная плазма (ЛП).

Разрядная плазма

В качестве разрядного источника плазмы мы выбрали классическую вакуумную искру – разряд между двумя электродами с подачей рабочего вещества в межэлектродный промежуток путем абляции материала катода (олово) с помощью импульса лазерного излучения. Исследования аксиально-симметричных разрядов, в частности, в вакуумных искрах показали, что мягкое рентгеновское и ВУФ излучение происходят в плазме с токами выше 10 кА в момент развития в столбе разряда перетяжных неустойчивостей. Известно, что эти перетяжки или «микропинчи» развиваются в результате вытекания плазмы в условиях сильных радиационных потерь, в данном случае за счет линейчатого излучения многозарядных ионов олова (см., например, *K.Koshelev and N.Pereira "Plasma points and radiative collapse in vacuum sparks", J.Appl.Phys. 69, R21-44 (1991)*). Вытекание плазмы из перетяжки сопровождается сжатием и нагревом плазмы и переходу ко все более высоким кратностям ионизации. Радиус перетяжки определяется балансом джоулевого нагрева и энергетических потерь, в первую очередь, радиационных потерь в оптически плотной плазме.

Наблюдается (часто последовательное во времени) образование нескольких микропинчей, излучающих в EUV диапазоне. Этот эффект «скольжения» излучающей области вдоль оси разряда определяет интегральный во времени аксиальный размер источника.

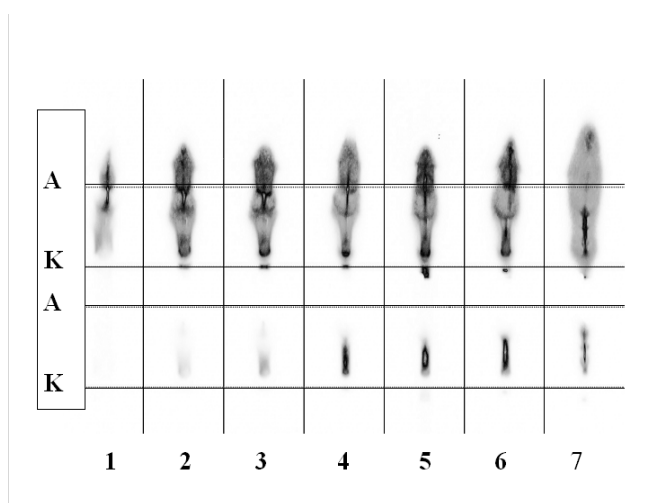


Рис.1. Изображение столба плазмы, полученные в собственном коротковолновом излучении с помощью микроканального детектора с регулируемым временем открытия (от 3 до 50 нсек).

Верхнее изображение – излучение во всей области чувствительности МКП (< 100 нм);

нижнее – через Zr/Si фильтр. Расстояние между анодом А и катодом К – 3 мм.

Для разряда с размерами в несколько миллиметров средняя выделяемая мощность в 100 и более кВт остаётся немислимо высоким значением. Возможное решение проблемы – так называемое «мультиплицирование» источника, то есть создание множества источников с распределением в них электрической и тепловой нагрузки. Однако, требование постоянства положения излучателя в пространстве и высокая рабочая частота (до 50-100 кГц) практически исключают «револьверную» систему с механическим повторением большого числа вакуумных искр с аксиально-симметричной системой электродов и изоляторов. Использование олова в сочетании с лазерной инициацией открывает особые возможности. Подача вещества в межэлектродный промежуток путем испарения поверхности электрода лазерным импульсом непосредственно обеспечивает аксиальную начальную симметрию независимо от формы электродов – начальная плазма разлетается в виде конуса с осью перпендикулярной поверхности электрода. Система с вращающимися электродами, нижний из которых покрыт жидким оловом (для облегчения возобновления поверхности), (Кривцун В.М., Колошников В.Г., Якушев О.) изображена схематично на рис. 2.

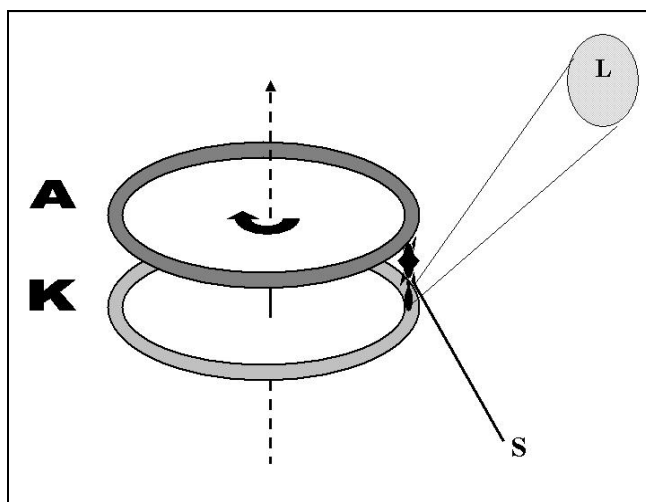


Рис. 2. Принципиальная схема «колесной» мультипликации

При вращении электродов в каждом новом выстреле лазер, положение фокуса которого не изменяется, испаряет олово с нового участка катодного кольца. Таким образом, возникает последовательность элементарных вакуумных искр, находящихся в одном и том же месте пространства, но опирающихся на различные участки плоского катода. Желательно только, чтобы в промежутке между импульсами предыдущее положение фокуса лазера «отъехало» от нового на расстояние в 1–2 мм – размер зоны временно «испорченной» разрядом поверхности. При частоте повторения 10^4 Гц это соответствует минимально необходимой линейной скорости вращения порядка 10 м/сек. Принцип такого подхода был проверен на установках «PROTO 1» и «PROTO 2» (рис. 3). Эксперименты и расчеты показывают, что подобные системы способны выдерживать электрические мощности до 50, возможно, до 100 кВт.



Рис 3. Прототип EUV источника с вращающимися электродами. Рабочие параметры: электрическая мощность – 18 кВт; $\text{CE} \approx 2\%$; полезная мощность излучения ≈ 360 Вт.

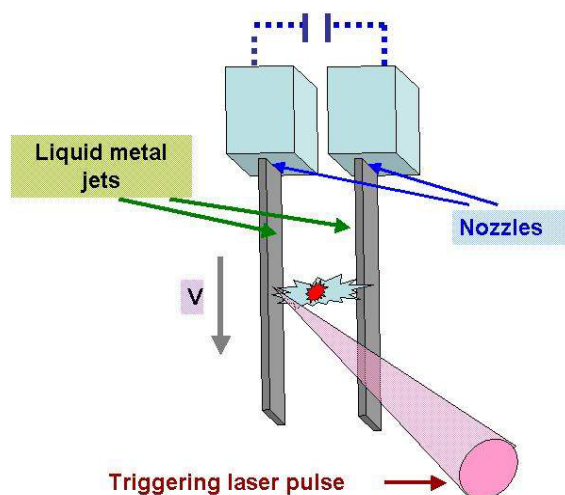


Рис 4. Схематическое изображение «струйного» источника EUV излучения.

Дальнейшее развитие идея «непрерывной мультипликации» получила в струйном варианте источника. В качестве электродов предложено использовать две струи жидкого металла или сплава с невысокой температурой плавления, вытекающие с большой скоростью из металлических сопел. (Иванов В.В., Кривцун В.М., Якушев О.Ф.) К струям приложено напряжение, и разряд между ними возникает при фокусировке лазерного излучения на одной из них (рис. 4). Струи не только уносят тепло, выделяющееся в разряде, но и эффективно охлаждают ближайшие к разряду металлические элементы – сопла. Струи попадают в теплообменник и, охладившись, возвращаются с помощью насосов в систему. Ресурс мощности такого технического решения – 200 кВт.

Лазерная плазма

Необходимая плотность мощности EUV излучения может быть обеспечена не только в разрядном источнике плазмы но и при фокусировке лазерного излучения на поверхность мишени (EUV LPP). И в этом случае олово оказалось наилучшим материалом мишени. Основные процессы здесь – нагрев мишени (в форме капли с размером $\sim 30\text{--}100$ мкм) лазерным излучением приводит к ее частичному испарению. Последующий пробой паров олова формирует плазму, эффективно поглощающую энергию лазерного излучения. После подъема температуры плазмы до ~ 50 эВ и появления многократно ионизованных ионов ($Z > \sim 10$) плазма начинает излучать вблизи 13.5 нм. Длительность лазерного излучения 10–100 нс, что означает быстрый выход параметров плазмы на квазистационарный режим истечения с падением плотности плазмы $\sim 1/r^2$. В результате размер источника определяется в основном размером капли олова $\sim 100\text{--}200$ мкм. Малый размер EUV источника излучения на лазерной плазме позволяет собирать излучение с большого телесного угла $\sim 2\pi$, тем самым снижая полную необходимую мощность лазерной энергии по сравнению с разрядным источником излучения. Все же полная необходимая электрическая мощность в случае EUV LPP существенно выше чем в разрядном источнике за счет малого кпд лазера. Оптимальной длиной волны излучения считается 10 мкм, соответствующая CO_2 лазеру с кпд $\sim 5\text{--}10\%$. Излучение такого лазера поглощается при относительно низкой плотности плазмы $\sim 1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, в которой оптическая толщина плазмы по EUV излучению близка к 1, т.е. эта область является эффективным излучателем. Проблема мультиплицирования решается за счет образования серии быстро летящих капель (~ 100 м/с) и разработки лазера с высокой частотой следования импульсов $\sim 5 \cdot 10^4\text{--}1 \cdot 10^5$ Гц. Схема EUV LPP приведена на рис. 5.

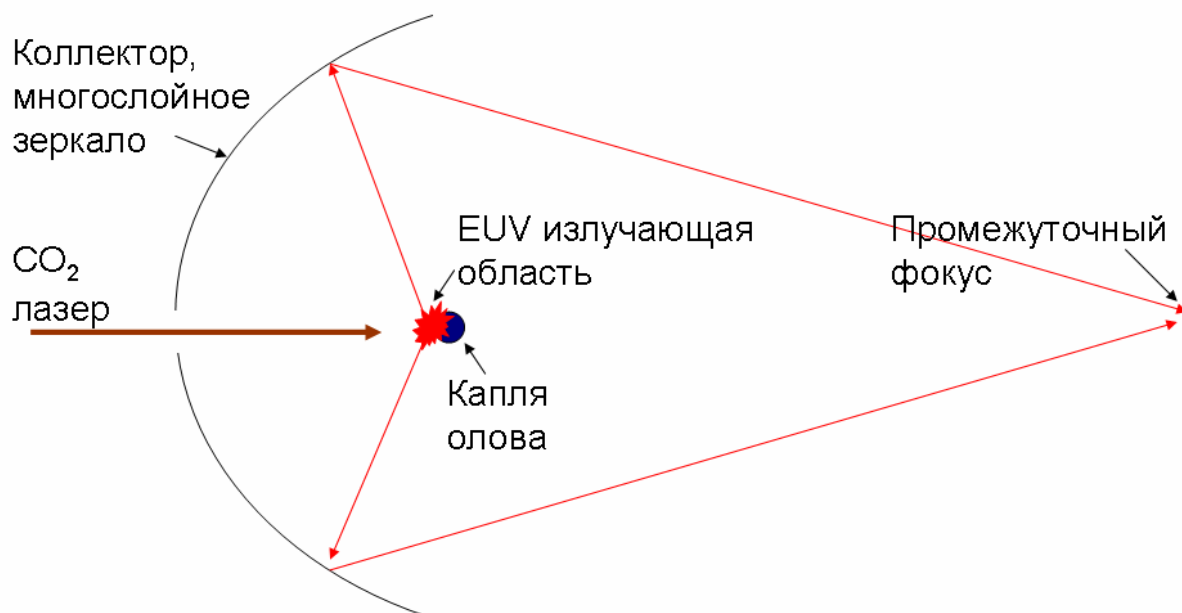


Рис 5. Схематическое изображение источника EUV излучения на основе лазерной плазмы.

EUV LPP имеет как свои преимущества: большое расстояние до любого элемента конструкции камеры, большой телесный угол сбора излучения, так и свои недостатки: первое зеркало, коллектор обеспечивающий большой телесный угол сбора излучения должно быть многослойным зеркалом и оно находится под действием паров олова и быстрых ионов (нейтралов) лазерной плазмы.

Изучение EUV LPP в лаборатории было начато сравнительно недавно. К настоящему времени готова установка, позволяющая проводить эксперименты с измерением углового распределения EUV излучения, спектра EUV излучения а также углового распределения быстрых ионов плазмы и их зарядового состава, с целью разработки методов защиты коллектора. Фотография установки приведена на рис. 6.



- 1 – турбомолекулярный насос
- 2,4 – EUV детекторы
- 3 – анализатор плазмы
- 5 – спектрограф
- 6 – ионный спектрометр
- 7,9,10 – цилиндр Фарадея
- 8 – вакууметр
- 11 – окно для фотографирования

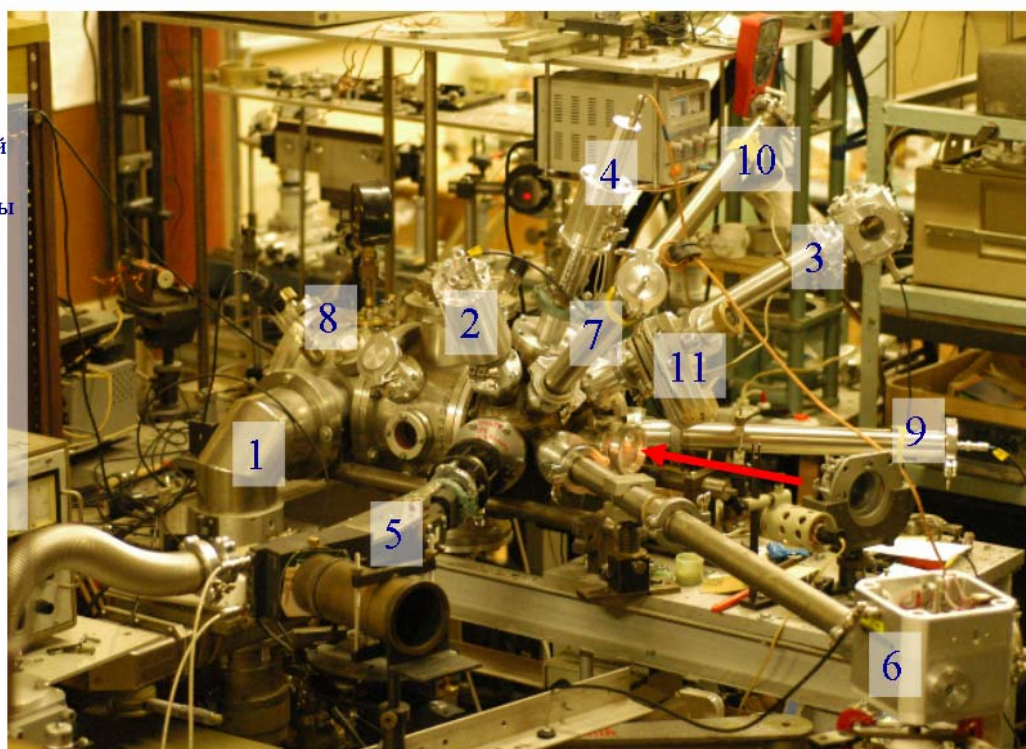


Рис 6. Установка для проведения работ по EUV LPP источнику излучения.

Параллельно с разработкой экспериментальной установки была разработана совместно с Институтом Прикладной Математики РАН численная двумерная модель RZLine процессов, протекающих в EUV LPP, включая процесс испарения капли и подробный спектр излучения плазмы. EUV источники используют узкий спектральный интервал, поэтому положение расчетных линий спектра должно с большой точностью совпадать с экспериментальными данными (Иванов В.В. совместно с Новиковым В.В. и Соломянной Ф. (ИПМ).

Чтобы рассчитать радиационные явления была использована новая программа THERMOS-BEELINE которая позволяет проводить самосогласованные расчеты кинетики уровней и радиационный транспорт для различных плазменных конфигураций. Она включает радиационный транспорт перекрывающихся спектральных линий произвольной оптической плотности реалистическими профилями линий, проверенную базу атомных данных для материалов с низкими Z (H, He, O) а также для Xe, Sn и их смесей. Детали описаны в статье в “High Energy Density Physics”, V.3, 2007, p. 198-203.

Капиллярный разряд для создания плазменных оптических волноводов

Создание лазерных систем, способных обеспечить плотности мощности светового излучения 10^{18} - 10^{19} Вт/см², позволило поставить ряд новых проблем, которые еще недавно были предметом чисто теоретических исследований. К ним относятся ускорение электронов в поле, возбуждаемом лазерным импульсом в водородной плазме, а также генерация гармоник с частотами, попадающими в рентгеновскую область. Спецификой этих задач является необходимость поддержания эффективного взаимодействия излучения с веществом на длинах в несколько сантиметров и больше. Особый интерес к проблеме лазерного ускорения электронов связан с возможностью создания “table-top” ускорителей с энергией порядка 100 ГэВ, которые, в свою очередь, могут явиться основой для рентгеновских лазеров на свободных электронах. Отмеченные высокие плотности излучения достигаются в результате фокусировки, при этом продольный масштаб области фокусировки определяется в идеальном случае дифракцией (см. рис.8). Его численное значение дается Рэлеевской длиной Z_R : $Z_R = \pi w_0^2 / \lambda$.

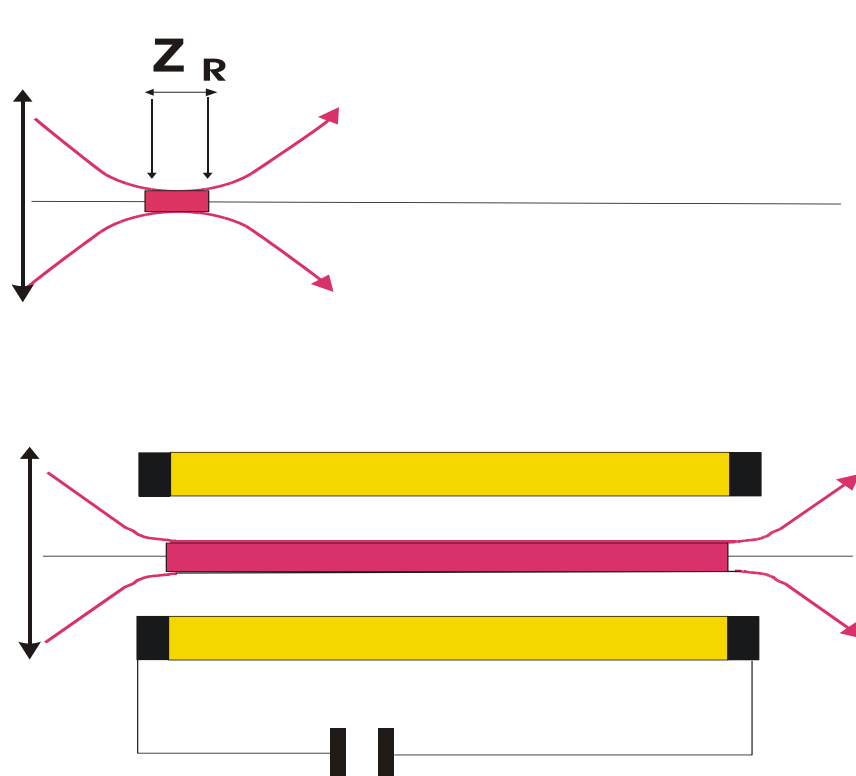


Рис. 7. Использование плазменного оптического волновода для преодоления рэлеевского ограничения длины взаимодействия электронов с лазерным полем.

аиболее разработанный на сегодняшний день способ преодоления этого ограничения длины взаимодействия заключается в создании плазменного оптического волновода с помощью капиллярного разряда (см. рис.5). Разряд с током 300-500А в капилляре с внутренним диаметром 200-500 мкм, наполненном водородом под давлением порядка 0.1атм, позволяет получить плазменную структуру с полым в радиальном направлении профилем электронной плотности. Для таких плазменных каналов с длиной до 5 см было экспериментально продемонстрировано пропускание излучения с плотностью 10^{17} Вт/см².

Институт спектроскопии включился в работы по созданию плазменных оптических волноводов в 2002 году совместно с FOM-институтом физики плазмы, Нидерланды. Первой идеей, разработанной в лаборатории спектроскопии плазмы, было применение магнитного поля для существенного улучшения характеристик плазменных каналов в капиллярных разрядах (V.V. Ivanov, K.N. Koshelev, E.S. Toma, F. Bijkerk, Influence of an axial magnetic field on the density profile of capillary plasma channels – J. Phys. D: Appl. Phys. **36**, p.832-836, (2003)). Тем не менее, описанный в этой работе способ создания плазменного волновода обладает рядом недостатков, таких как трудность создания каналов с длиной более 10 см и проблема управления плотностью на оси разряда вследствие десорбции со стенки капилляра.

В лаборатории спектроскопии плазмы была разработана новая методика, позволяющая преодолеть эти проблемы V.V. Ivanov, P.S. Antsiferov, and K.N. Koshelev. Numerical simulation of the creation of a Hollow Neutral-Hydrogen Channel by an Electron Beam. - Phys.Rev.Letters 2006, v.97, p.205007. Основной идеей является локальный импульсный нагрев водорода с помощью остросфокусированного электронного пучка (см. рис.9). В отличие от светового, электронный пучок может быть удержан в сфокусированном состоянии на произвольной длине с помощью внешнего магнитного поля. Ряд элементарных процессов, начинающихся с ионизации водорода в объеме электронного пучка, приводит к быстрому локальному нагреву и расширению, что, в свою очередь, приводит к возникновению полого радиального профиля плотности нейтрального водорода в газовой ячейке (см. рис.2). Временной масштаб расширения лежит в области одной микросекунды, что делает удобным временную синхронизацию мощного лазерного импульса, который одновременно является и ионизирующим, и взаимодействующим с плазмой.

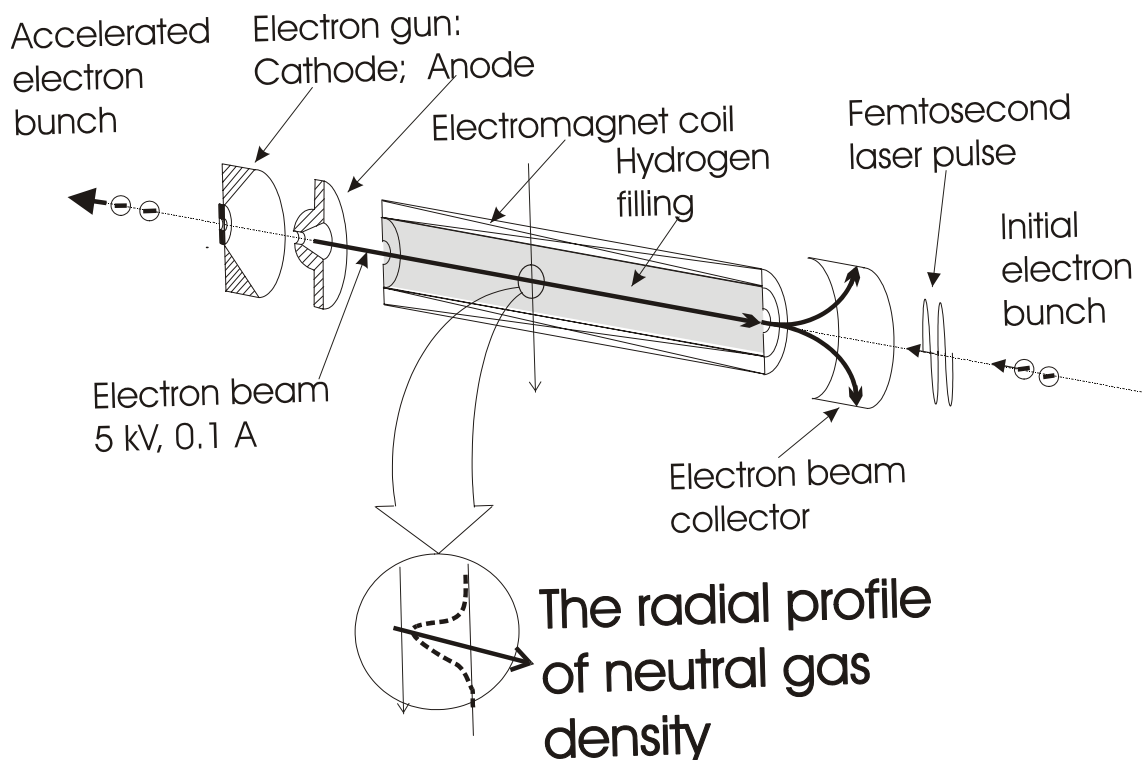


Рис. 8. Создание оптического плазменного световода с помощью электронного пучка.

ОТДЕЛ ЛАЗЕРНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ



Начало отделу лазерной спектроскопии положила организация летом 1970 г. двух связанных общей научной программой, установками и учеными лабораторий: лазерной спектроскопии (зав. лабораторией д.ф.-м.н. В.С.Летохов) и сектора спектроскопии возбужденных состояний (зав. сектором к.ф.-м.н. Р.В.Амбарцумян, позже зав. лабораторией д.ф.-м.н. Е.А.Рябов). Ядро лаборатории составляли молодые ученые, приглашенные из отдела квантовой радиофизики Физического института им. П.Н.Лебедева, и студенты МФТИ, для которых ИСАН стал базовым институтом по специальности “Квантовая оптика”.

В основу научной программы лабораторий были положены оригинальные идеи по новым методам лазерной спектроскопии и селективному воздействию лазерного излучения на вещество, которые опережали аналогичные идеи за рубежом. Это во многом предопределило успех научной программы, несмотря на заметное отставание уровня имевшегося научного оборудования от соответствующего оборудования зарубежных лабораторий. Позднее, в составе группы лазерных лабораторий была организована лаборатория пикосекундной спектроскопии (зав. лабораторией д.ф.-м.н. П.Г.Крюков и позже к.ф.-м.н. Ю.А.Матвеев), которая удачно расширила круг исследуемых научных проектов и позволила создать полноценный отдел лазерной спектроскопии, который достиг численности около 50 человек к 1985 г. Отдел представляет собой единый коллектив тесно связанных друг с другом и объединенных общими целями научных сотрудников и специалистов. В период перестройки и трудностей с финансированием от РАН, отдел сконцентрировался на наиболее актуальных задачах при меньшей численности (25 человек в 2003 г.). Дополнительное финансирование было получено по грантам РФФИ, по научно-техническим программам Миннауки и совместным работам с зарубежными организациями.

Лаборатория лазерной спектроскопии



Лаборатория лазерной спектроскопии была создана летом 1970 г. и ее первым заведующим с момента организации и до декабря 2001 г. был д.ф.-м.н. В.С.Летохов, с 2002 г. заведующим лаборатории является д.ф.-м.н. В.И.Балыкин.

Первыми научными сотрудниками лаборатории были О.Н.Компанец и О.А.Туманов, которые перешли в Институт из ФИАНа вместе с В.С.Летоховым. В настоящее время в лаборатории работает пятнадцать научных сотрудников.

За основу научной программы лаборатории были положены оригинальные идеи по новым методам лазерной спектроскопии и селективному воздействию лазерным излучением на вещество.

Среди ранних работ следует упомянуть выполненный в 1976 г., совместно с лабораторией атомной спектроскопии эксперимент [1] по поиску усиления в мягкой рентгеновской области многозарядных ионов в лазерной плазме. В работе была предложена схема накачки неона-подобных многозарядных ионов. Именно

по такой схеме и на предсказанном переходе был запущен в Ливерморской лаборатории им. Э. Лоуренса (США) первый рентгеновский лазер. Следует упомянуть также идеи по разработке новых типов экзотических лазеров, таких как: лазеры в атмосферах звезд и лазеры в космосе с некогерентной обратной связью за счет резонансного рассеяния (д.ф.-м.н. В.С.Летохов, 1972-1974), лазеры на γ -переходах с лазерным разделением изомерных ядер (д.ф.-м.н. В.С.Летохов, 1971-1973 гг.).

Литература

А.Н.Жерихин и др. Об усилении в области дальнего вакуумного ультрафиолета на переходах многозарядных ионов. Квантовая электроника, **3**, 152 (1976).

Лазерная спектроскопия без доплеровского уширения

При достаточно низком давлении газа основной вклад в уширение спектральных линий атомов и молекул дает эффект Доплера. Использование лазерного света в качестве источника излучения позволило разработать принципиально новые методы спектроскопии без доплеровского уширения [1-3]. В основе методов нелинейной спектроскопии без доплеровского уширения, основанных на насыщении поглощения доплеровски уширенной спектральной линии, лежит явление изменение распределение частиц по скоростям на квантовых уровнях резонансного с полем перехода. Первые эксперименты по методам нелинейной спектроскопии в лаборатории были проведены уже в 1971-1972 гг. (О.Н.Компанец, Б.Д.Павлик). Позднее за разработку принципов лазеров с высокостабильной частотой колебаний света на основе сверхузких нелинейных оптических резонансов без доплеровского уширения В.С. Летохову совместно с В.П.Чеботаевым была присуждена Ленинская премия (1978 г.).

Литература

1. а) В.С.Летохов, В.П.Чеботаев. Принципы нелинейной лазерной спектроскопии. (Изд. Наука, Москва), 1975. б) V.S.Letokhov, V.P.Chebotayev. Nonlinear Laser Spectroscopy (Springer-Verlag, Berlin), 1977.
2. V.S.Letokhov. Laserspektroskopie (Akademic-Verlag, Berlin), 1977.
3. а) В.С.Летохов. Нелинейные селективные фотопроцессы в атомах и молекулах (Физматгиз, Москва), 1983. б) V.S.Letokhov. Nonlinear Laser Chemistry with Multiple-Photon Excitation (Springer-Verlag, Berlin), 1983.

Резонансная фотоионизационная спектроскопия

Одним из основных методов селективного воздействия лазерным излучением на атомном уровне является резонансная многоступенчатая ионизация, которая позволяет как разделять атомы различного сорта, в том числе изотопы, так и детектировать их [1]. В 1971 г. в совместном эксперименте с сектором спектроскопии возбужденных состояний (Р.В.Амбарцумян) была впервые осуществлена резонансная ступенчатая ионизация на примере атомов Rb [2, 3]. С тех пор и по настоящее время, метод ступенчатой ионизации (рис.1) разрабатывается в лаборатории в разных схемах и вариантах для решения многих задач: детектирование очень редких изотопов и одиночных атомов; детектирование короткоживущих ядер на ускорителе; разделение изотопов, ядерных изобар и ядерных изомеров; получение чистых фотоионных пучков и т.д.

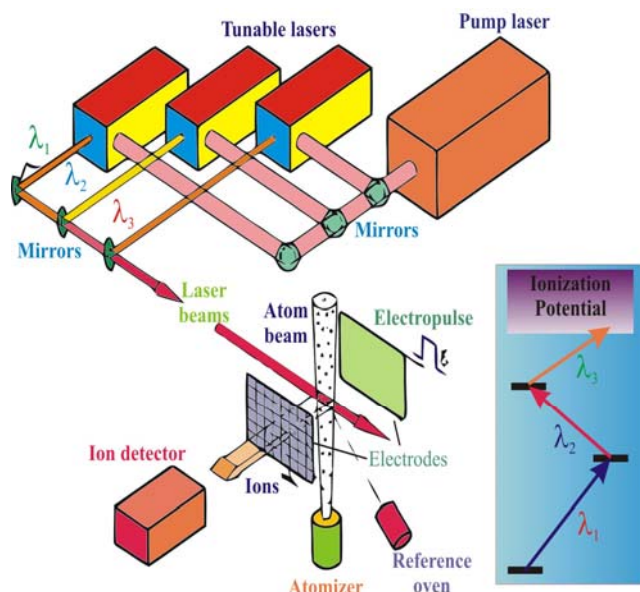


Рис.1. Лазерный резонансно-фотоионизационный спектрометр для ультрачувствительного анализа следов элементов (справа показаны схемы ступенчатой ионизации через ридберговские и автоионизационные состояния).

Лазерное фотоионизационное детектирование одиночных атомов успешно реализовано на первой в мире уникальной установке для изучения короткоживущих ядер и разделения ядерных изомеров в ЦЕРНе (г. Женева).

На рис.2 показаны три подхода лазерной резонансно-ионизационной спектроскопии, использующие ионизацию атомов в пучке (а), в квазизамкнутой горячей полости (b) и ускоренном атомном пучке (с). Подход, показанный на рис.2а, был использован в осуществленном в 1977 г. эксперименте по резонансно-ионизационному детектированию

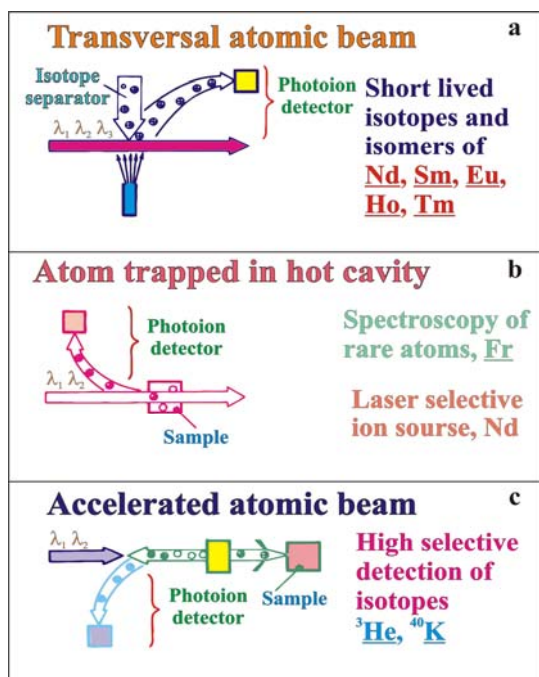


Рис.2. Три подхода лазерной резонансной ионизационной спектроскопии. Справа указаны некоторые радиоактивные изотопы, исследованные каждым из методов.

единичных атомов (Na в пучке) [4]. К настоящему времени, этот метод превратился в мощный ультрачувствительный метод спектроскопии атомов и молекул, по которому, начиная с 1982 г., каждые два года проводятся международные конференции. Институт спектроскопии является ведущим научным центром по разработке и использованию этого метода.

Одной из областей успешного применения метода резонансно-ионизационной спектроскопии является ультрачувствительный спектральный анализ. Это было успешно продемонстрировано в совместных с ЦНИИГРИ МинГео экспериментах по детектированию благородных элементов и элементов платиновой группы в океане [5а]; совместно с ГЕОХИ АН СССР обнаружению родиевой аномалии на границе третичного периодов (65 млн. лет тому назад) [5б]; эксперименте по измерению ридберговских состояний и потенциала ионизации атома Fr в образце,

содержащем всего 10^5 атомов.

Метод резонансной ионизации в сочетании с идеей электростатического ускорения атомов (в виде ионов) в пучке (рис.2с) был предложен [7] и успешно использован (группа Ю.А.Кудрявцева) для решения исключительно трудной задачи – оптического детектирования очень редких изотопов на фоне основных изотопов с относительным содержанием $>10^{10}$ раз. На рис.3 показаны результаты первого эксперимента по лазерному детектированию атома ^3He [8].

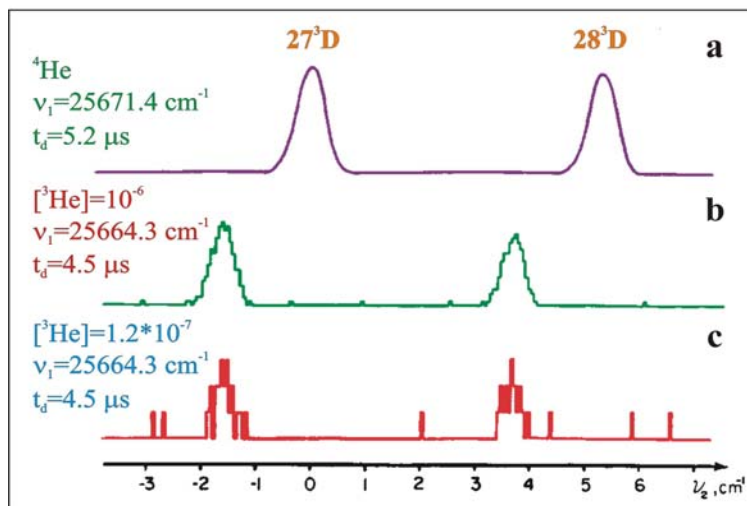


Рис. 3. Детектирование редкого изотопа ^3He в пучке ускоренных атомов He. Представлена зависимость ионного сигнала от частоты лазера на второй ступени резонансного возбуждения метастабильных атомов ^4He и ^3He при различном относительном содержании.

Сегодня этот метод разрабатывается в нескольких лабораториях (США, Германии и др.) для детектирования других очень редких изотопов.

Резонансно-ионизационная спектроскопия была успешно использована (группа В.И.Мишина) в экспериментах по лазерной спектроскопии атомов с короткоживущим ядром для измерения характеристик последних (моменты и вариации среднего зарядового радиуса) на ускорителях Ленинградского Института ядерной физики АН (ЛИЯФ) и Европейского Центра ядерных исследований (ЦЕРН). В ходе этих экспериментов [9] было впервые осуществлено оптическое разделение ядерных изомеров. Позднее на основе этого метода создан лазерный Z-селективный источник фотоионов (т.е. лазерный сепаратор изобар) для ядерно-физических экспериментов (совместно с ЛИЯФ АН СССР в Гатчине). Затем этот метод был успешно реализован на установке ISOLDE ЦЕРН [10] и на данный момент времени он широко используется во многих экспериментах ядерной физики и воспроизводится в ядерных лабораториях Японии, Канады и др. На рис.4 показана схема лазерного ионного источника в ЦЕРН, созданного совместно с Институтом спектроскопии, для широкого класса экспериментов методами A^+ , α , β , γ и n -спектроскопии.

Наряду с фотоионизационным методом детектирования единичных атомов в лаборатории, начиная с 1977 г. [8] успешно развивался флуоресцентный метод (группа В.И.Балыкина). Осуществлено и исследовано детектирование единичных атомов натрия флуоресцентным методом, предложен и реализован универсальный метод повышения селективности детектирования единичных атомов по их флуоресценции, основанный на многофотоэлектронной регистрации сигнала от атома. Показано, что метод позволяет получить селективность детектирования более высокую, чем селективность, ограниченную такой фундаментальной причиной, как перекрытие спектральных линий поглощения атомов.

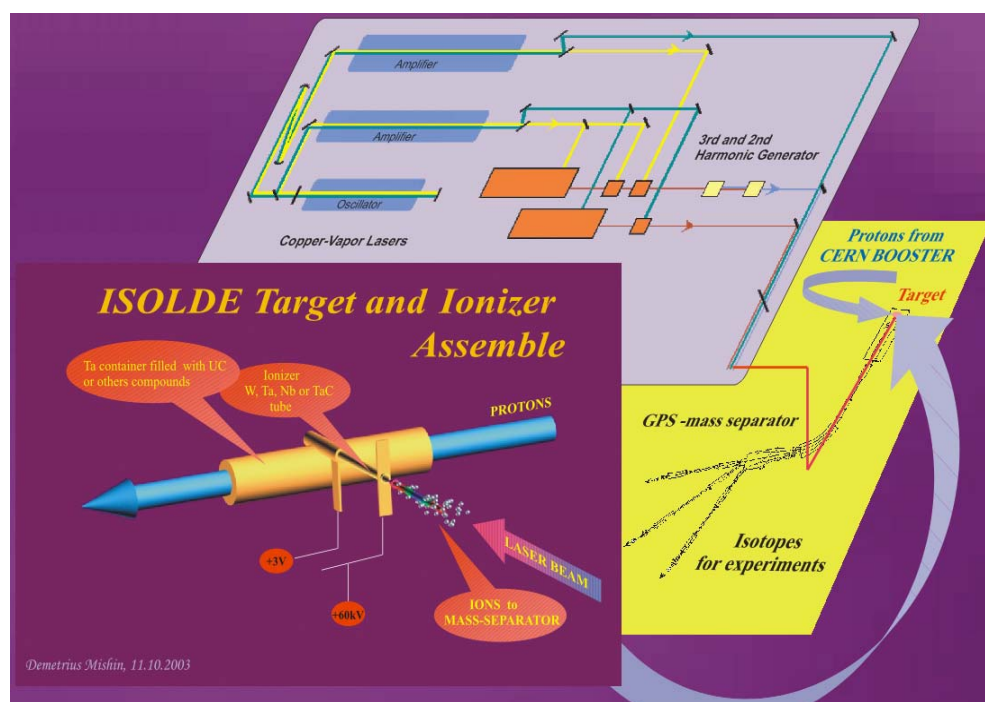


Рис. 4. Схема лазерного фотоселективного источника ионов для разделения ядерных изотопов, изомеров и изобар, созданного Институтом спектроскопии совместно с Университетом г.Майнц в ЦЕРН (Женева).

Литература

1. В.С.Летохов. Способ фотоионизации газа лазерным излучением. Авт. свид. N 784679 с приоритетом от 30.03.1970. Бюлл. изобретений, 1982, N8, с.308.
2. Р.В.Амбарцумян, В.П.Калинин, В.С.Летохов. Двухступенчатая селективная фотоионизация атомов рубидия лазерным излучением. Письма в ЖЭТФ, 13, 305 (1971)
3. R.V.Ambartzumian and V.S.Letokhov. Selective Two-Step (STS) Photoionization of Atoms and Photodissociation of Molecules by Laser Radiation. Appl. Optics, 11, N2, 354 (1972).
4. Г.И.Беков, В.С.Летохов, В.И.Мишин. Лазерное фотоионизационное детектирование единичных атомов натрия через ридберговские состояния. Письма в ЖЭТФ, 27, 52 (1972).
5. G.I.Bekov, V.S.Letokhov et al. a) Ruthenium in the Ocean. Nature, 312, 748 (1984); b) Rhodium distribution at the Cretaceous/Tertiary boundary analyzed by ultrasensitized laser photionization. Nature, 332, 146 (1986).
6. S.V.Andreev, V.S.Letokhov, V.I.Mishin. Laser resonance photoionization spectroscopy of Rydberg levels in Fr. Phys. Rev. Lett. 59, 1274 (1987).
7. (a) Yu.A.Kudriavtsev and V.S.Letokhov. Method of highly selective detection of rare radioactive isotopes through multistep photoionization of accelerated atoms. Appl. Phys. B29, 219 (1982); (b) S.A.Aseyev, Yu.A.Kudriavtsev, V.S.Letokhov and V.V.Petrinin. Laser detection of the rare isotope He at concentrations as low as 10^{-9} . Optics Letters 16, 514 (1991).
8. В.И.Балыкин, В.С.Летохов, В.И.Мишин, В.А.Семчишен. Лазерное флуоресцентное детектирование единичных атомов. Письма в ЖЭТФ 26, 492 (1977).
9. V.I.Mishin et al. Resonance photoionization spectroscopy and laser separation of ^{141}Sm and ^{164}Tm nuclear isomers. Opt. Comm. 61, 383 (1987).

10. G.P.Akhazov et al. Nucl. Instr. and Methods in Phys. Res., A306, 402 (1991);
(b) V.I.Mishin, V.N.Fedoseyev et al. Instr. and Methods in Phys. Res. B73, 550 (1993).

Астрофизическая спектроскопия

Начиная с 2002 г в совместных работах с Институтом Астрономии Лундского Университета, Швеция (проф. S. Johansson) проводился комплекс исследований по объяснению аномальных спектральных эффектов в окрестности самой массивной яркой звезды нашей Галактики – η Carinae, Рис.5. Данные исследования, выполненные на основе наблюдений с помощью космического телескопа Хаббл (Швеция) [1], привели к открытию астрофизического лазера [2,3], действующего на $\lambda \approx 1$ мкм в газовой конденсации в окрестности звезды *Эта Карина* (проф. В.С.Летохов).

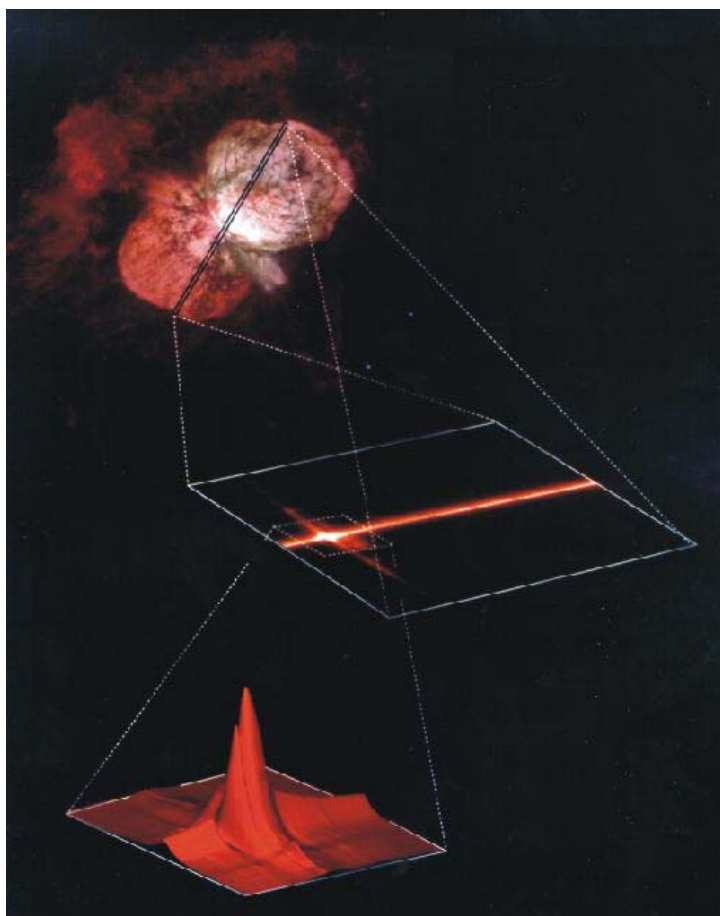


Рис. 5. Spectra of η Car and its nebula have been obtained in high spectral and spatial resolution with the Space Telescope Imaging Spectrograph (STIS) onboard the Hubble Space Telescope (HST), where the slit has been positioned across and besides the star, along with and tilted against the direction of the bipolar lobes.

Литература

1. S.Johansson, V.S.Letokhov. Mysterious UV Lines of FeII from η Car Blobs. In: *Eta Carinae and Other Mysterious Stars*. T.Gull, S.Johansson, K.Davidson (Eds.), ASP Conf. Series, vol. 242, 297-308 (2001).
2. S.Johansson and V.S.Letokhov. Laser Action in Space: 1 μ m Lines of FeII in Gaseous Condensations in the Vicinity of η Car. *Pis'ma ZhETF* 75, 591-594 (2002).
3. S.Johansson and V.S.Letokhov. Radiative Cycling of FeII with Stimulated Emission from Atoms and Ions in an Astrophysical Plasma. *Phys. Rev. Lett.* 90, No1, 011101-1-4 (2003).

Лазерное охлаждение и пленение нейтральных атомов

Начиная с 1976 г., в лаборатории лазерной спектроскопии стали разрабатываться идеи управления (охлаждения, пленения) движением атомов с помощью лазерного излучения. Атом в лазерном поле может поглощать фотоны, переходя при этом в возбужденное состояние, при этом фотоны передают ему свои импульсы. Девозбуждаясь атом переизлучает фотоны по всем возможным направлениям (рис.6А). В результате атом испытывает световое давление в направлении распространения лазерного луча. Возбуждение атома происходит в том случае, когда частота света близка к частоте оптического перехода атома. Атом, с частотой перехода ν_0 , двигаясь вдоль оси лазерного луча частоты ν , испытывает максимальное световое давление при резонансной скорости $V^{\text{доп}} = (\nu - \nu_0) \lambda$ (эффект Доплера), где λ – длина волны лазерного излучения. Если $\nu < \nu_0$, то резонанс возникает, когда атом движется против распространения луча и в этом случае атом замедляется (рис.6В). Если атомарный газ со всех сторон облучать лазерным светом с частотой меньше частоты атомного перехода, то в газе увеличивается количество медленных атомов, что и означает уменьшение его температуры. Минимальная температура атомарного газа при лазерном охлаждении составляет 10^{-6} К.

После первых теоретических работ [1-3] последовали первые успешные эксперименты по замедлению и охлаждению атомов в пучке [4] и его коллимации [5]. Первое в мире лазерное охлаждение атомов было реализовано в Отделе лазерной спектроскопии ИСАН [4,5]. На рис.6С показаны результаты лазерного охлаждения пучка атомов Na. Температура пучка атомов Na была уменьшена от начальной температуры 600 К до 1,5 К (группа В.И.Балыкина). При продольном охлаждении атомов увеличивается их поперечная скорость вследствие флуктуационного роста импульса атомов при поглощении и испускании фотонов лазерного света. На определенном этапе продольного охлаждения, продольная скорость становится сравнимой с поперечной, и для дальнейшего охлаждения атомов необходимо поперечное охлаждение пучка. В лаборатории в 1984 г. впервые реализовали такое поперечное охлаждение, при котором была достигнута следующая рекордная температура атомов 0,003 К [6]. Это значение температуры уже близко к так называемому квантовому (Допплеровскому) пределу охлаждения атомов: двухуровневый атом в лазерном поле может быть охлажден до температуры не ниже $T_{\text{min}} = h\gamma/k_B$ (h – постоянная Планка, 2γ – однородная ширина линии поглощения атомов, k_B – постоянная Больцмана).

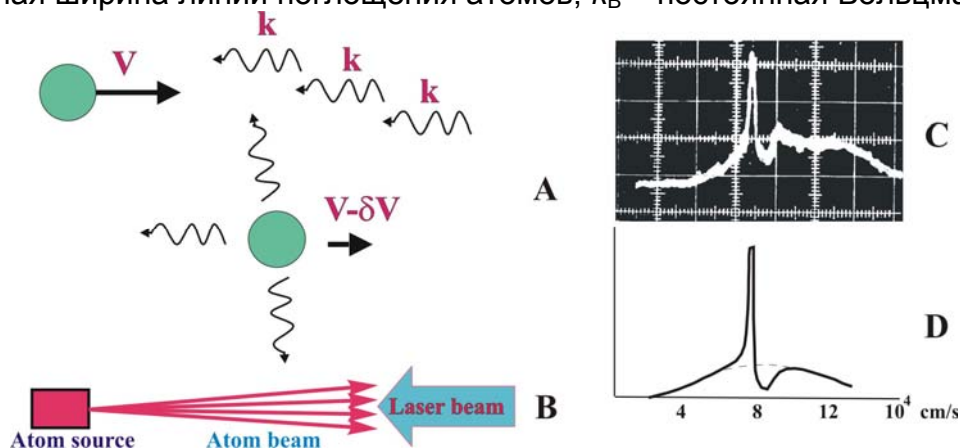


Рис. 6. Лазерное охлаждение атомов: А - принципиальная схема возникновения светового давления на атом; В - схема эксперимента по лазерному охлаждению атомов; С - скоростное распределение охлажденного атомного пучка (эксперимент); D - расчет.

Выражение для квантового предела охлаждения атомов впервые получил В.Г.Миногин и др. еще в работе 1977 г. [2]. В этой же работе рассчитана схема трехмерного лазерного охлаждения. Реализация такой идеи оказалась достаточно сложной. Авторы предложили способ облучения атомов шестью лазерными лучами, направленными так, чтобы вдоль каждой из осей координат распространялись два встречных луча. В области пересечения должно создаваться центрально-симметричное световое поле. Лазерное поле такой конфигурации было использовано в 1985 г. группой лаборатории фирмы “Белл” в США. В этом эксперименте была достигнута температура 240 мК – следующий рекордный результат. Это значение T совпадает с квантовым пределом $h\gamma/k_B$.

Все эти эксперименты по охлаждению атомов позволили уменьшить энергию нейтральных атомов до таких величин, при которых стала возможной их пространственная локализация с помощью электрических, магнитных и лазерных полей. Это открыло новые экспериментальные возможности для резкого снижения температуры уже “холодных” атомов и начался новый этап исследований по более глубокому лазерному охлаждению. Хронология всех этих работ показана на рис.7.

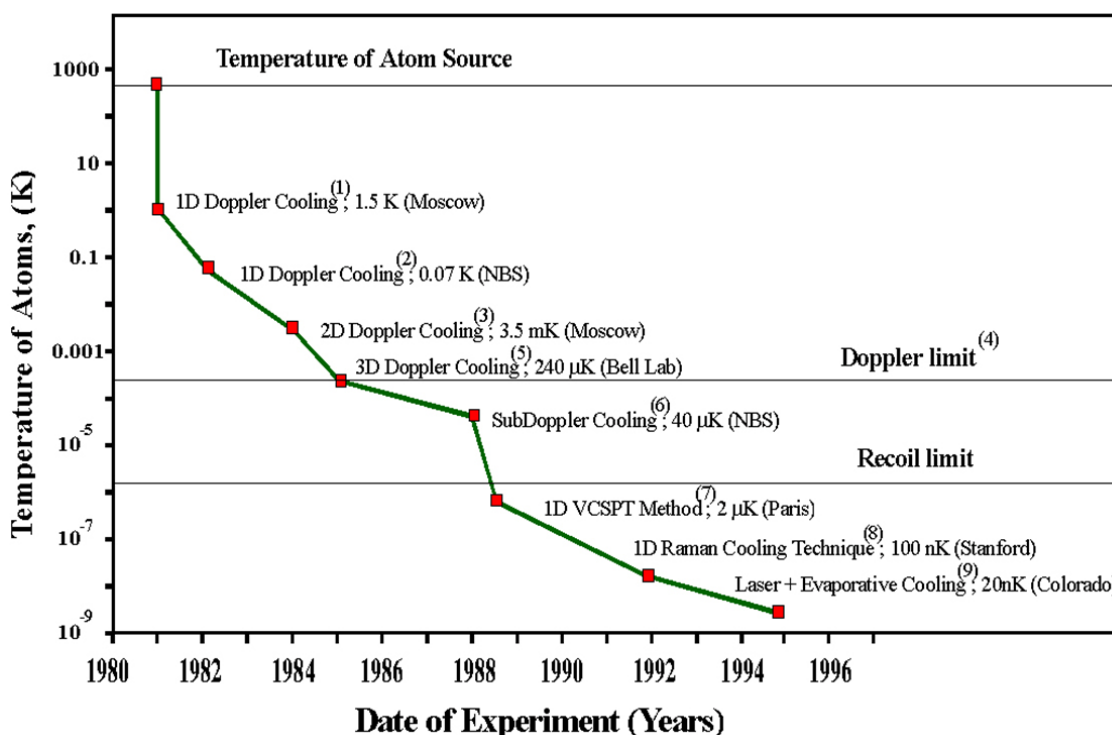


Рис. 7. Прогресс в лазерном охлаждении атомов (ключевые эксперименты), начавшийся с работ, выполненных в Институте спектроскопии в 1981 г.

Лаборатория лазерной спектроскопии была первой в мире, в которой начались эксперименты по контролю движения атомов лазерным излучением. Сегодня, в этом наиболее активном направлении атомной и лазерной физики работают десятки лабораторий мира.

Развитые методы лазерного охлаждения тепловых атомных пучков позволили перейти к решению другой важной физической проблемы: охлаждению релятивистских пучков в накопительных кольцах. Существует много приложений охлажденных релятивистских ионных пучков среди которых наиболее интересными представляются проверки специальной теории относительности и спектроскопические измерения, которые проводятся в различных накопительных кольцах.

Исследования по охлаждению релятивистских ионных пучков проводились в совместных экспериментах на накопительном кольце Ядерного института общества Макса-Планка в г.Хайдельберг (The Test Storage Ring, TSR) Германия [7]. Физика охлаждения ионов в ускорителях существенно отличается от физики получения холодных нейтральных атомов. Проведенные эксперименты с ионными пучками показали, что достижимая минимальная температура ограничена совершенно другими процессами, чем в тепловых пучках. При охлаждении релятивистских пучков помимо величины силы светового давления решающую роль играет так называемый скоростной диапазон действия силы светового давления. Реализованное уменьшение начальной температуры ионов более чем на два порядка позволяет говорить о создании кардинально нового подхода в охлаждении релятивистских ионов в накопительных кольцах.

Существующие методы охлаждения нейтральных и заряженных частиц (атомов, молекул или их ионов) основаны на использовании разного рода диссипативных процессов. Например, электронное охлаждение заряженных частиц осуществляется за счет столкновений горячих ионов с холодным электронным газом, что ведёт к диссипации тепловой энергии ионов к холодным электронам. Этот метод нашел широкое применение в увеличении фазовой плотности быстрых ионных пучков в накопительных кольцах. Наиболее развитый метод охлаждения нейтральных атомов (а также и локализованных ионов), основан на неупругом столкновении нейтральных атомов с фотонами лазерного света.

В лаборатории исследовалась возможность принципиально нового метода понижения температуры нейтральных атомов, основанного на получении информации о трансляционном состоянии (координаты и скорости) индивидуальных атомов и использовании этой информации для разделения медленных и быстрых атомов. Это, в свою очередь, приводит к уменьшению температуры части первоначального ансамбля атомов и, соответственно, к повышению его фазовой плотности. Такой метод был назван “информационным охлаждением нейтральных атомов” [8-9].

Литература

1. V.S.Letokhov, V.G.Minogin and B.D. Pavlik. Cooling and trapping of atoms and molecules by resonant laser-field. Optics Comm. 19, 72 (1976).
2. V.S.Letokhov, V.G.Minogin and B.D. Pavlik, ЖЭТФ, 72, 1328 (1977).
3. V.S.Letokhov and B.D.Pavlik. Spectral Line Narrowing in Gas by Atoms Trapped in a Standing Light Wave. Appl. Phys. 9, 229 (1976).
4. В.И.Балыкин, В.С.Летохов, В.И.Мишин. Охлаждение атомов Na резонансным лазерным излучением. Письма в ЖЭТФ, 29, 614 (1979); ЖЭТФ, 78 1376 (1980).
5. С.В.Андреев, В.И.Балыкин, В.С.Летохов, В.Г.Миногин. Радиационное замедление до 1.5 K и монохроматизация пучка атомов Na встречным лазерным лучом. Письма в ЖЭТФ, 34, 463 (1981); ЖЭТФ, 82, 1429 (1982).
6. В.И.Балыкин и др. Радиационная коллимация атомного пучка, путем двумерного охлаждения лазерным излучением. Письма в ЖЭТФ 40, 251 (1984); JOSA, B2, 1776 (1985).
7. S. Schroder, R. Klein, N. Boos, M. Gerhard, R. Grieser, G. Huber, A. Karafillidis, M. Krieg, T. Kuhl, R. Nemann, V.Balykin, M. Grieser, D. Habs, E. Jaeschke, D.Kramer, M.Kriestensen, M.Music, W. Petrich, D. Schwalm, P. Sigray, M. Steck, B. Wanner, and A. Wolf, “First laser cooling of relativistic ions in storage ring“, Phys. Rev. Letts., **64**, 2901-2904 (1990).

8. V. I. Balykin, V. S. Letokhov, "On the possibility of "informational" cooling of neutral atoms", JETP Lett. **72**, 11 (2000).
9. V. I. Balykin, V. S. Letokhov, "Information cooling of neutral atoms" Phys. Rev., **A64**, 063410 (2001).

Атомная оптика

В результате исследований по воздействию сил светового давления лазерного излучения на поступательные движения атомов в середине 80-х годов возникла новая физическая дисциплина – *атомная оптика*. Атомная оптика является оптикой материальных частиц (наряду с электронной, ионной и нейтронной оптикой) и занимается проблемами формирования потоков нейтральных атомов, управления ими, а также вопросами их применения [1-8]. К кругу исследуемых физических вопросов относятся нахождение потенциалов взаимодействия атомов с электромагнитными полями, которые обеспечивают контролируемое воздействие на пространственное движение атомов: дифракция атомных волн, отражение, фокусировка, локализация атомов, а также увеличение фазовой плотности атомных ансамблей. В атомной оптике движение нейтральных атомов в электромагнитных полях во многом подобно поведению световых пучков в неоднородно оптических средах. Хотя у атомной и световой оптики схожие математические обоснования, их технические средства различны. В основе световой оптики лежит техника полировки поверхностей необходимой формы из различных материалов. В атомной оптике имеется только одна среда – электромагнитное поле. Использование разнообразных конфигураций лазерных полей, электрических и магнитных полей позволило построить основные элементы *геометрической* атомной оптики, аналогичные элементам обычной оптики – атомные линзы, зеркала, дефлекторы и модуляторы атомных пучков.

Развитие атомной оптики тесно связано с развитием методов лазерного охлаждения атомов, которые позволили понизить температуру атомов до величины всего лишь на одну миллионную градуса выше абсолютного нуля. При таких температурах волна де Бройля становится сравнимой с длиной волны света и начинают заметно проявляться волновые свойства атомов. Лазерное охлаждение атомов привели к возникновению атомной *волновой* оптики. На основе различных конфигураций лазерных световых полей, микро и наноструктур созданы когерентные делители атомных пучков, атомные интерферометры, волноводы и, наконец, аналог оптического лазера – атомный лазер.

Возможности атомной оптики значительно шире в сравнении с другими типами оптик материальных частиц из-за наличия внутренней структуры атома. При температуре близкой к абсолютному нулю, когда длина волны де Бройля становится сравнимой с расстоянием между атомами, поведение атомного ансамбля начинает зависеть от внутренней квантовой характеристики атома – его спина. В 1924 г. Бозе и Эйнштейн предсказали для бозе-частиц явление их конденсации, получившей название Бозе-Эйнштейновской конденсации (БЭК). Атомы в состоянии Бозе-Эйнштейновской конденсации образуют новый тип «когерентного вещества». Первые атомные конденсаты были получены в 1995 г. Магнитная ловушка, удерживающая атомы БЭК, является аналогом оптического резонатора для фотонов в оптическом лазере. Атомы из ловушки могут быть «выпущены» в определенном направлении (как фотоны через полупрозрачное зеркало оптического резонатора лазера) и тем самым они образуют когерентный направленный пучок, аналогичный лазерному лучу [9]. Такое устройство получило название *атомного лазера*. Значительный интерес к атомным лазерам связан с возможностью применения когерентных атомных пучков в высокоточных

измерительных приборах и тонких технологиях при создании атомных и молекулярных структур.

Основным элементом в любом виде оптики (фотонов, электронов, заряженных частиц или нейтронов) является линза. Поэтому очень важно найти конфигурации лазерных полей, которые могли бы через резонансное взаимодействие с атомами осуществлять фокусирующее действие на нейтральные атомные пучки. Исследования [1] различных конфигурации лазерного излучения убедительно продемонстрировали возможность острой фокусировки атомов при использовании высокой плотности лазерного излучения. Выбором параметров атомного пучка и лазерного излучения удастся, с учетом всех видов aberrации, сфокусировать атомы в размеры близкие к дифракционному и составляющему величину порядка одного ангстрема. Рис.8 иллюстрирует схему глубокой фокусировки атомного пучка лазерным полем и пространственное распределение атомом в фокусе атомной линзы.

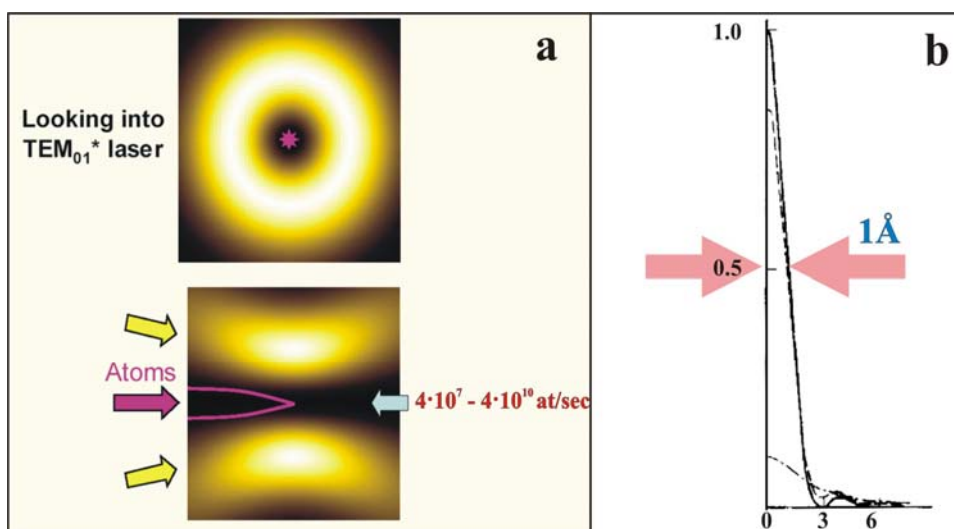


Рис. 8. Глубокая фокусировка атомного пучка в с размером около одного ангстрема:

(a) относительное расположение лазерного поля и атомного пучка;

(b) поперечное распределение атомной плотности в фокусе атомной линзы.

Исследование дифракции атомных волн де Бройля представляет как самостоятельный физический интерес, так и значительный прикладной интерес: Была теоретически исследована и экспериментально реализована схема дифракции атомных волн де Бройля, позволяющая осуществлять пространственный и временной контроль атомного пучка (сканер атомных волн де Бройля) аналогично электронному пучку в электронной оптике. Показана возможность создания «атомно-лучевой трубки» для целей атомной и молекулярной нанолитографии. В эксперименте ультрахолодные атомы были получены в магнито-оптической ловушке с температурой $T \sim 100 \text{ мкК}$ (рис.9а), дифракция (рис.9b) атомных волн осуществлялась на образованной лазерными лучами управляемой дифракционной решётке (совместно с Университетом электрокоммуникаций, Токио, Япония).

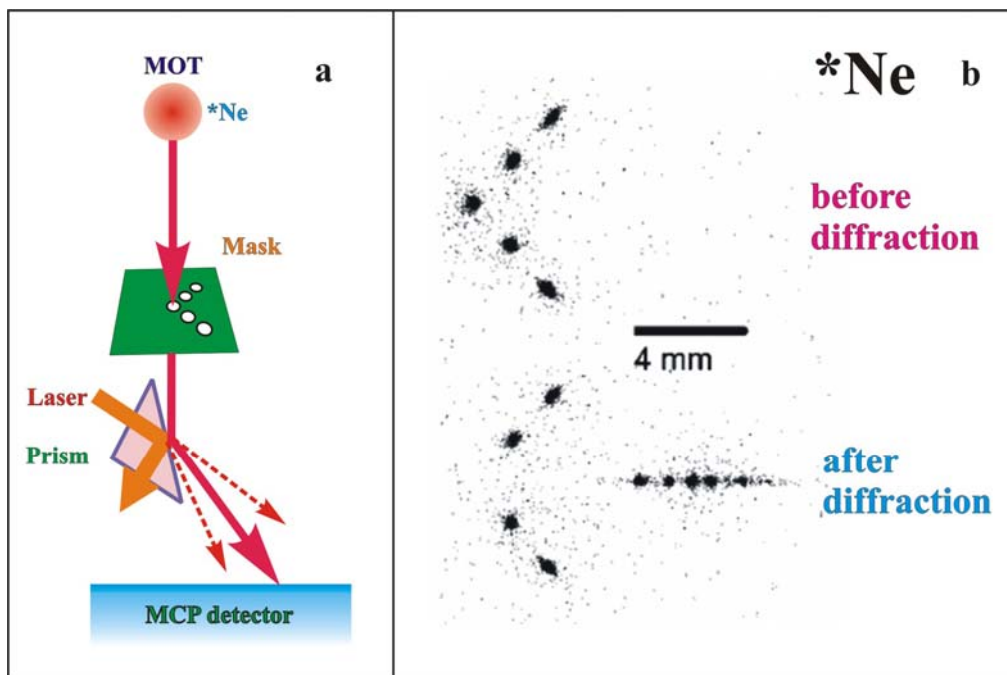


Рис. 9. Дифракция атомных волн де Бройля:
а) схема эксперимента; б) экспериментальные данные.

Рис.10 иллюстрирует различные методы лазерного управления пучком атомов, впервые осуществленные в Институте спектроскопии: Это охлаждение атомов, фокусировка, каналирование и отражению атомного пучка от градиента светового поля. На рис.11 показана установка источника ультрахолодных атомов на основе магнитооптической ловушки.

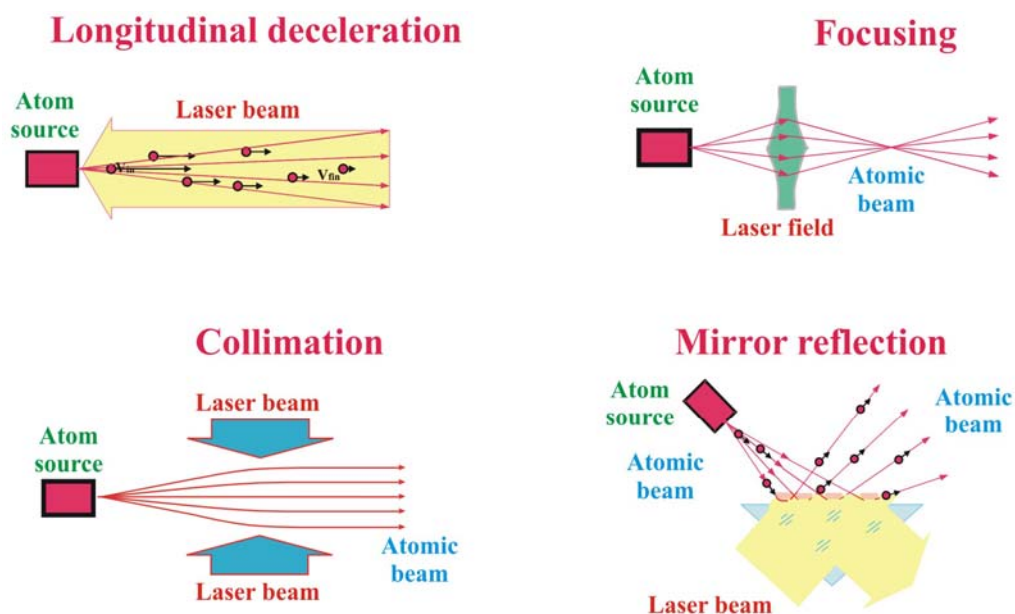


Рис. 10. Различные методы лазерного управления пучком атомов, впервые осуществленные в Институте спектроскопии. Охлаждение атомов; фокусировка, каналирование и отражение атомного пучка от градиента светового поля.

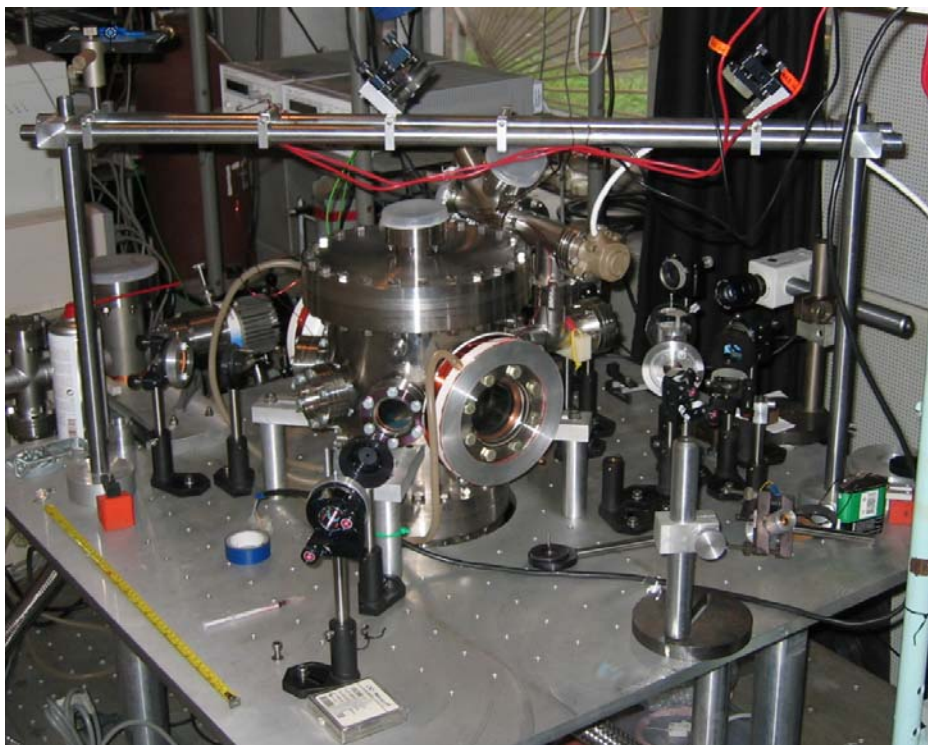


Рис. 11. Экспериментальная установка по получению ультрахолодных атомов на основе Магнито-Оптической Ловушки.

Литература

1. В.И.Балыкин и др.. Письма в ЖЭТФ 43, 172 (1986); V.I. Balykin, V.S. Letokhov, "The possibility of deep laser focusing of an atom beam into the A region", Opt. Commun., 64, 151-156, 1987. В.И.Балыкин и др. Глубокая фокусировка атомного пучка. Письма в ЖЭТФ 59, 219 (1994).
2. V.I.Balykin et al. Channeling of atoms in a standing spherical wave. Opt. Letters 13, 958 (1988).
3. В.И.Балыкин и др. Отражение светового пучка от градиента светового поля. Письма в ЖЭТФ, 45, 282 (1987); Phys. Rev. Lett. 60, 2137 (1988).
4. V.I.Balykin, V.S.Letokhov. Phys. Today 4, 23 (1989).
5. V.I.Balykin, V.S.Letokhov. "Atom Optics with Laser Light", Laser Science and Technology, Vol. 18, Harwood Academic Publ., Australia et al. (1985).
6. V.I.Balykin. Advances in Atomic, Molecular and Optical Physics. Vol. 41, 181 (1999).
7. V.I.Balykin, V.G.Minogin, V.S.Letokhov. Rep. Prog. Phys. 63, 1429 (2000).
8. V.Minogin et al. Phys. Reports, 365, 65 (2002)
9. V.I.Balykin, V.S.Letokhov, Atomic cavity with light induced mirrors, Appl. Phys. B48, 517-523, 1989.

Нанооптика и нанофотоника

Нанооптика является разделом оптики, в которой изучаются взаимодействие излучения наноразмерных полей с атомами, молекулами и нанотелами. *Нанофотоника* является разделом нанооптики, в которой исследуются нанополья со считанным количеством фотонов и исследуются поведение света на нанометровой шкале. Из общих физических соображений следует, что нанополья могут существовать и создаваться только вблизи поверхностей материальных сред. Поскольку электромагнитные поля должны удовлетворять граничным условиям уравнения Максвелла, то в свою очередь, нанополья зависят от размеров и топологии материальных сред. Известные

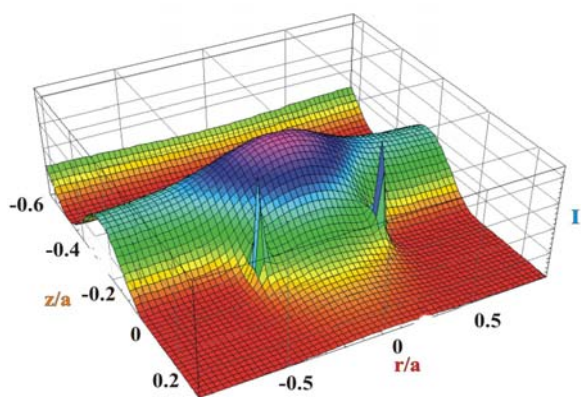


Рис. 12. Конфигурация двумерного нанополя, возникающего при дифракции света на отверстии Бета.

примеры нанополей: (1) поле, возникающее при полном внутреннем отражении волны на поверхности диэлектрика (одномерная локализация света), (2) нанополь на поверхности металла (плазмоны) и (3) нанополь вблизи острия (двумерная локализация света). Основной интерес к нанооптике обусловлен возможностью преодоления дифракционного предела в пространственном разрешении волновой микроскопии. Основным интерес к нанофотонике – это возможность увеличения величины напряженности электромагнитного поля при заданной величине энергии поля.

В лаборатории лазерной спектроскопии интенсивно исследовались многочисленные конфигурации нанополей, которые представляют как самостоятельный интерес, так и в связи с их применением в атомной нанооптике. Одномерное нанополь использовалось при создании атомного зеркала [1-5],

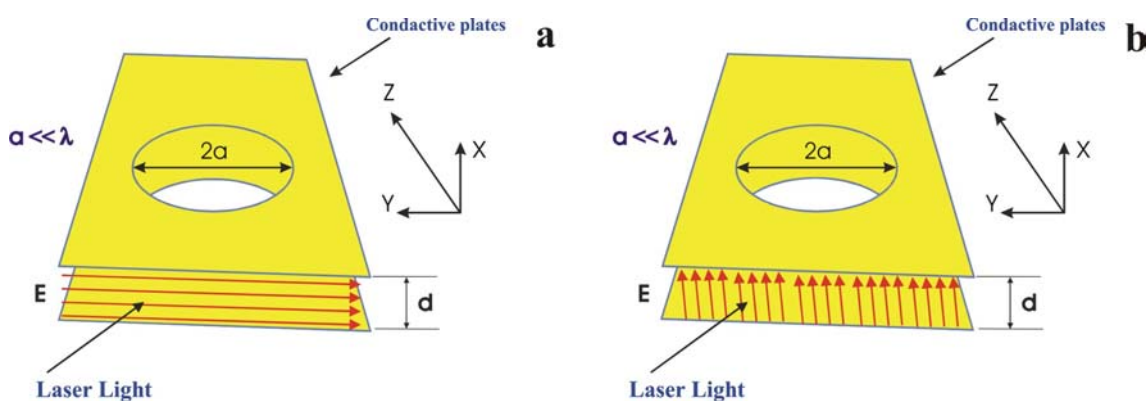


Рис. 13. Схема получения трехмерной локализации нанополя - в проводящий волновод с двумя нанотверстиями вводится излучение: (а) поляризация поля направлена вдоль волновода; (б) поляризация поля - поперек волновода.

дифракционной решетки и сканера атомных волн де Бройля [6,7], для атомных наноловушек [8,9], двумерное нанополь – для фокусировки атомов, создания атомных наноструктур на поверхности [10,11] и атомных нановолноводов [12,13], трехмерное нанополь - создания для атомных ловушек [14].

Рис.12 показывает конфигурацию двумерного нанополя возникающее при дифракции света на отверстии Бета [10] (отверстие диаметра меньше длины волны в проводящем тонком экране). “Просачивание” поля через малое отверстие в экране создает пространственную неоднородность интенсивности поля. Характерный размер нанополя определяется размером отверстия и может быть существенно меньше длины волны света.

Существенным недостатком поля, локализованного вблизи одиночного отверстия, является тот факт, что это поле неразрывно связано с полем сопутствующей стоячей волны, что является нежелательным для многих применений, например для атомной фокусировки, так как при движении атома в этой области возможны процессы спонтанного распада, которые влияют на качество фокусировки. На рис.14 представлены конфигурации полей имеющих трехмерную локализацию на нанометровой шкале. Схема получения такого

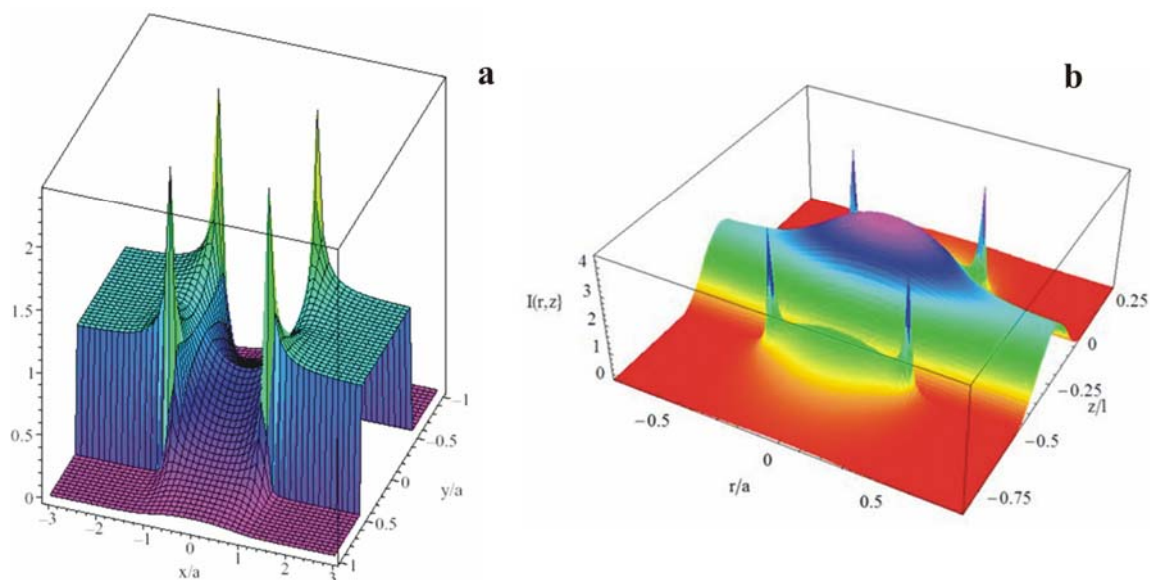


Рис. 14. Трехмерная локализация лазерного поля в нанометровом диапазоне:
а) photon hole; б) photon dot.

меньше длины волны света, образуют плоский двумерный волновод. В проводящем экране образованы два малых соосных отверстия с радиусом меньшим длины волны. Если диаметры отверстий существенно меньше длины волны, то излучение в волноводе практически не распространяется через эти отверстия, но вблизи каждого отверстия распространяющееся излучение будет сильно модифицировано. Если поляризация поля направлена вдоль волновода, то в центре возникает уменьшение интенсивности поля. Такое поля названо "фотонной дыркой", рис.14(а). Если поляризация поля – поперек волновода, то возникает увеличение интенсивности поля. Такое поля названо "фотонной точкой" рис.14(б).

Нанополе возникающее при полном внутреннем отражении на плоской поверхности является одномерным распространяющимся нанополем. Развитие техники диэлектрических нановолноводов позволило создавать двумерные распространяющиеся нанополя [12,13]. На рис.15 показана двухмерная локализация лазерного поля в нанометровом диапазоне: фотонный нановолновод (photon nanofiber).

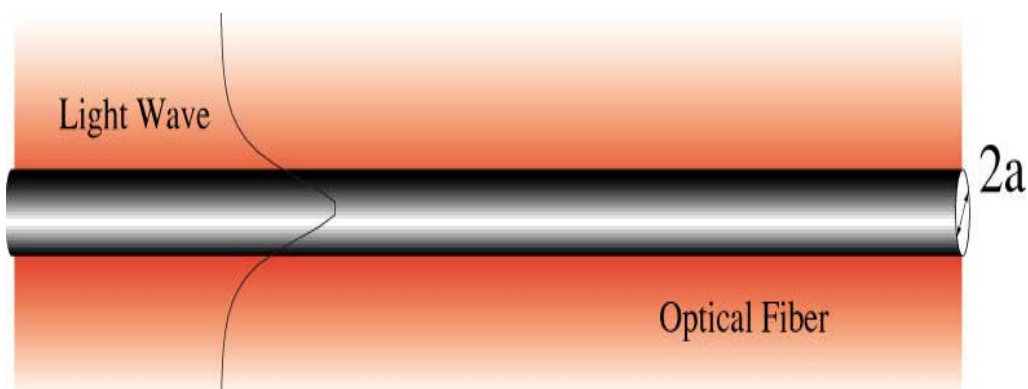


Рис. 15. Двухмерная локализация лазерного поля в нанометровом диапазоне:
photon nano fiber.

Такой оптический нановолновод экспериментально реализован совместно с Токийским университетом. На рис.16 показана установка по созданию кварцевых оптических нановолноводов. Электронная фотография такого нановолновода

диаметром 100 нм показан на рис. 17. Оптический нановолновод обеспечивает с единичным инжектируемым в волновод фотоном сильное поверхностное световое поле. Нановолновод использовался при исследовании взаимодействия лазерного нанополя с ансамблем ультрахолодных атомов. Используя спектроскопию высокого разрешения измерены светоиндуцированные силы действующие на атом, ван дер Ваальское взаимодействие и обнаружена значительная модификация скорости спонтанного излучения атома вблизи нано волновода, (рис. 18) [15]. Продемонстрирована эффективная связь поля излучения атома с модой оптического нановолновода [15].

Литература

1. В.И.Балыкин и др. Отражение светового пучка от градиента светового поля. Письма в ЖЭТФ, 45, 282 (1987); Phys. Rev. Lett. 60, 2137 (1988).
2. Seifert, W, Adams, C.S., Balykin V.I., et al. Reflection of metastable argon atoms from an evanescent-wave, Phys Rev, A49, 3814, 1994.
3. Yu. B. Ovchinnikov, D. V. Laryushin, V.I. Balykin, V. S. Letokhov, "Cooling of atoms on reflection from a surface light wave", JETP Lett, 62, 113, 1995.
4. Yu. B. Ovchinnikov, D. V. Laryushin, V.I. Balykin, V. S. Letokhov, "Inelastic reflection of atoms from an evanescent light wave", Laser Physics, 6, 264-267, 1995.
5. D. V. Laryushin, Yu. B. Ovchinnikov, V.I. Balykin, V. S. Letokhov, "Reflection cooling of sodium atoms in an evanescent wave", Opt. Commun, 135, 138-148, 1997.
6. H. Oberst, Sh. Kasashima, V. I. Balykin, and F. Shimizu, "Atomic-matter-wave scanner", Phys. Rev. A68, 013606, 2003.
7. D. A. Lapshin, V.I. Balykin, V. S. Letokhov, "Diffraction of atoms by an evanescent wave grating formed by a periodic surface structure", Laser Physics, 7, 361-368, 1997.
8. Yu. B. Ovchinnikov, S.V. Shulga, and V.I. Balykin, "An atomic trap based on evanescent light wave", J.Phys. B: At.Mol.Opt.Phys., 24, 3173-3178, 1991.
9. V.I. Balykin, D. V. Laryushin, M. V. Subbotin, V. S. Letokhov, "A bright coherent source of de Broglie wave", Laser Physics, 7, 358-360, 1997.
10. Balykin V.I., Letokhov V.S., and Klimov V.V., Tight focusing of an atomic-beam by the near-field of diffracted laser-light, JETP Lett., 59, 235, 1994.
11. V. I. Balykin, V. V. Klimov, and V. S. Letokhov, "Atom Nanooptics Based on Photon Dots and Photon Holes", JETP Lett., 78, 8, 2003.
12. V. I. Balykin, K. Hakuta, Fam Le Kien, J. Q. Liang, and M. Morinaga, "Atom trapping and guiding with a subwavelength-diameter optical fiber", Phys. Rev. A70, 011401(R), 2004.
13. Fam Le Kien, J.Q. Liang, K. Hakuta, and V.I. Balykin, "Field intensity distributions and polarization orientations in vacuum-clad subwavelength-diameter optical", Opt, Commun., 242, 445, 2004.
14. V. I. Balykin, V.V. Klimov and V. S. Letokhov, "Atom Nano-Optics", Optics & Photonics News, 16, 33-36, 2005.
15. K. P. Nayak, P. N. Melentiev, M. Morinaga, Fam Le Kien, V. I. Balykin, and K. Hakuta Optical nanofiber as an efficient tool for manipulating and probing atomic fluorescence, Optics Express, 15, 5431 (2007).

Атомная нанооптика

Атомная нанооптика является частью атомной оптики, в которой исследуются и используют оптические нанополя и материальные наноструктуры для контроля и управления атомными и молекулярными пучками [1]. Из общих физических соображений ясно, что использование пространственно локализованных нанополей и наноструктур является более предпочтительным для построения элементов атомной оптики. В лаборатории были предложена концепция атомной нанооптики на основе новых типов световых полей, локализованных в нанометровых областях пространства таких как «фотонные точки» и «фотонные дырки», цилиндрические нанополя волноводов, поля вблизи нанометровых неоднородностей материальных сред и т.д.. Первым исследуемым нанополем в атомной нанооптике явилось одномерная поверхностная волна (evanescent wave). Впервые она была применена в экспериментах в лаборатории спектроскопии для отражения атомного пучка Na [2] и позднее в совместных экспериментах с университетом г. Констанц, Германия [3]. Использование тонких металлических пленок на поверхности диэлектрика позволяет существенно увеличить интенсивность лазерного поля возбуждением поверхностных плазмонных волн и, соответственно, увеличить предельные углы отражения атомов, что было продемонстрировано экспериментально [3]. Пространственно модулированная поверхностная волна является идеальной дифракционной решеткой для атомных волн де Бройля, что было успешно продемонстрировано экспериментально (рис.9) [4].

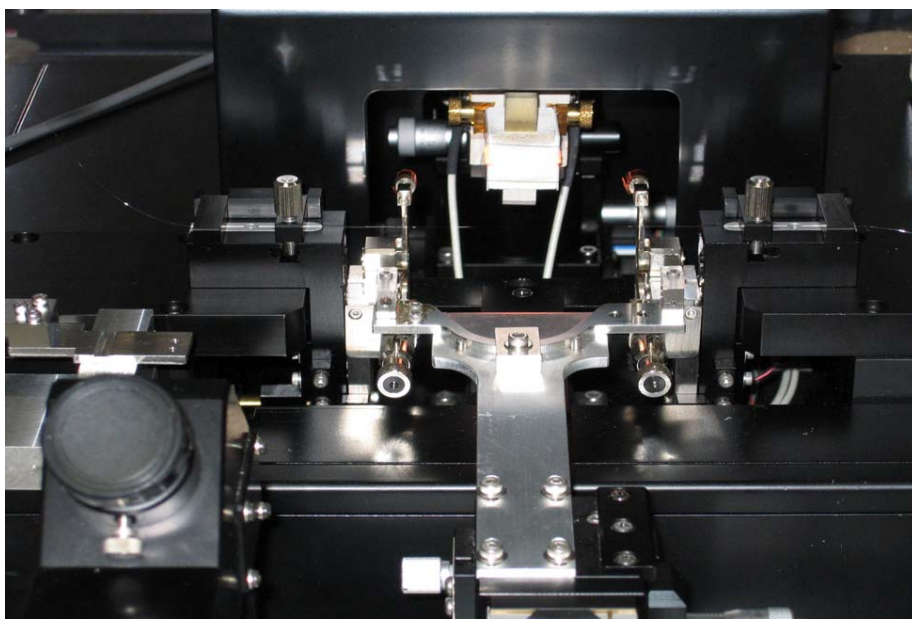


Рис. 16. Создание оптического нановолновода

Нанооптика и нанофотоника направлены на использование нанополей со считанным количеством фотонов в выделенной моде поля. В совместных с Токийским университетом экспериментах реализован оптический нановолновод, обеспечивающий с единичным инжектируемым в волновод фотоном сильное поверхностное световое поле [5]. На рис.16 показана экспериментальная установка по созданию оптических нановолноводов. На рис. 17 показана электронная фотография оптического нановолновода. Исследовано взаимодействие лазерного нанополя оптического волновода с ансамблем ультра холодных атомов, рис.18. Используя спектроскопию высокого разрешения измерены свето-индуцированные силы, действующие на атом, ван дер Ваальское

взаимодействие и обнаружена значительная модификация скорости спонтанного излучения атома вблизи нано волновода [6-9]. Продемонстрирована эффективная связь поля излучения атома с модой оптического нановолновода.

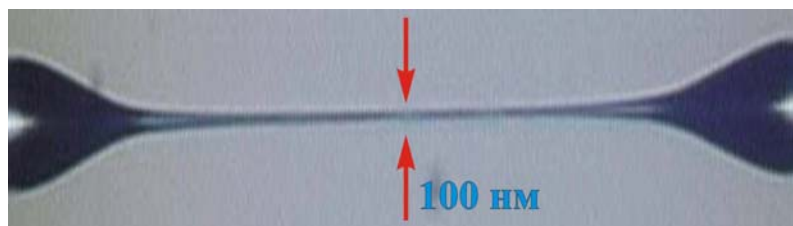


Рис. 17. Электронная фотография оптического нановолновода

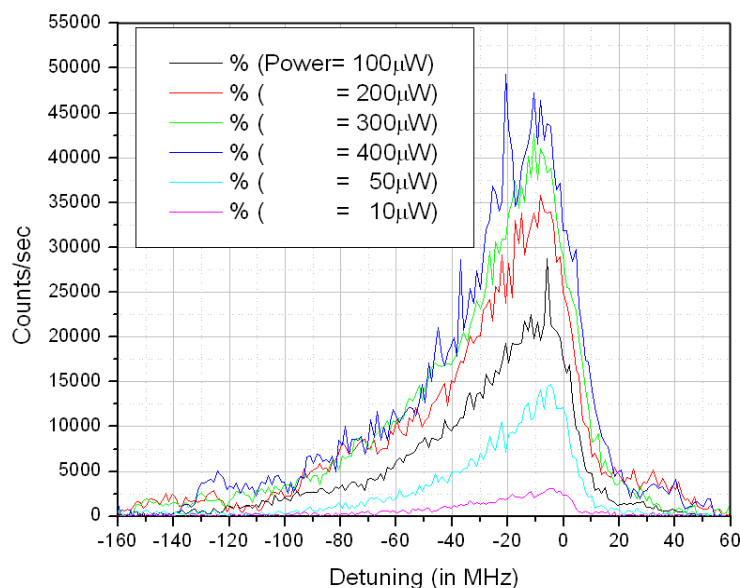


Рис. 18. Измерение формы линии перехода в атоме Cs вблизи поверхности нановолновода [6,11].

Нановолновод с инжектируемым в него лазерным излучением представляет возможность создания атомного волновода. Поверхностная волна нановолновода (рис.19(a)) обеспечивают удерживающий атом потенциал вблизи поверхности. Рис. 19(a) иллюстрирует траекторию атома в поле поверхностной волны, рис.19(b) показаны потенциал атома и, соответствующие уровни энергии локализованного атома [7-11].

Из многочисленных применений трехмерно локализованных нанополей - «фотонных точек» и «фотонных дырок» отметим только два: (1) для фокусировки атомов и (2) для нано локализации атомов. В случае "фотонной дырки" нанометровая область слабого поля окружена сильным полем внутри волновода и, при положительной расстройке частоты, пролетающий через поле атом будет притягиваться к оси системы, то есть будет происходить его фокусировка (рис.21) [1]. Чрезвычайно важно, что основное движение фокусируемых пучков происходит в области слабых полей и поэтому вероятность спонтанных распадов, приводящих к дефокусировке пучка, в этом случае чрезвычайно мала.

"Фотонная точка" (рис.14в), при отрицательной расстройке частоты втягивает в себя атомы, и таким образом снова происходит их фокусировка. В случае "фотонной точки" атом движется через область поля с повышенной интенсивностью и поэтому вероятность спонтанных распадов здесь выше, чем в случае "фотонной дырки", однако, время пролета через нанометровую область мало и влиянием спонтанных распадов на фокусировку снова можно пренебречь.

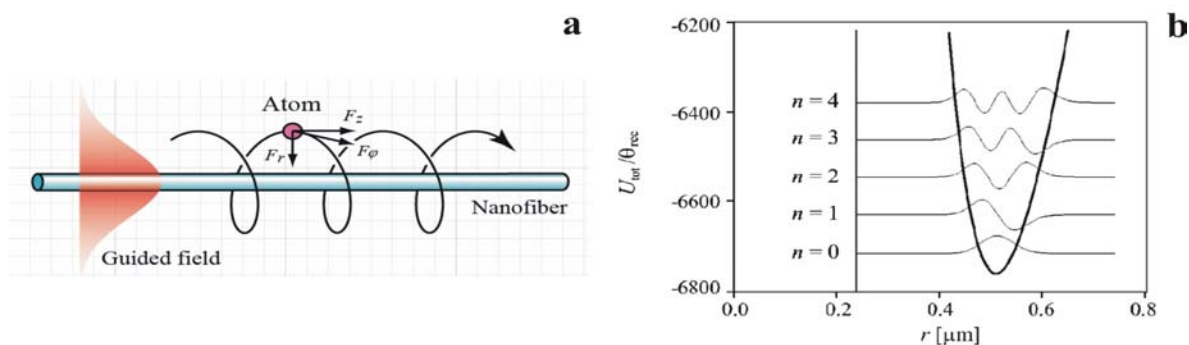


Рис. 19. (а) Локализованный атом в лазерном поле нановолновода; (б) Уровни энергии локализованного атома в лазерном поле нановолновода.

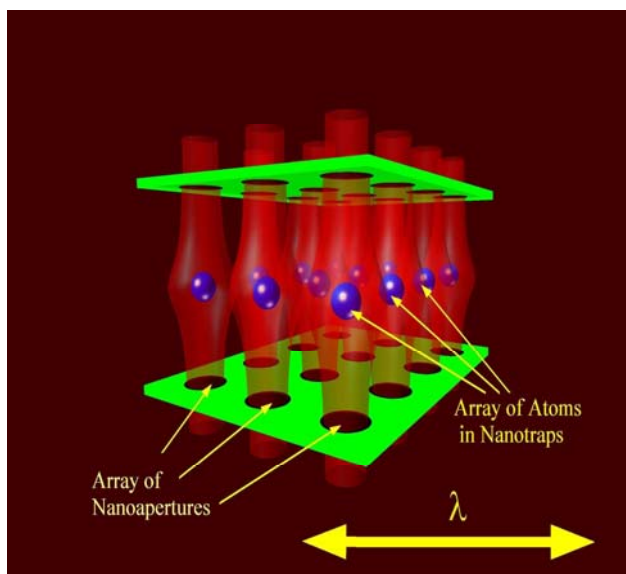


Рис. 20. Создание периодических - «атомных решеток» при локализации атомов решеткой «фотонных точек» [1,10].

Локализация нейтральных атомов [12,13] имеет важное как фундаментальное, так и прикладное значения. К настоящему времени реализованы атомные ловушки, основанные на использовании магнитных полей, электрических полей, лазерных и лазерно-магнитных полей. Характерной особенностью всех реализованных атомных ловушек является их малая глубина: глубина магнитных и электрических ловушек составляет величину порядка 10^{-2} К, глубина магнитно-оптических ловушек достигает величины порядка 1К, поэтому локализация атомов в таких ловушках стала возможной только после развития методов лазерного охлаждения нейтральных атомов.

С другой стороны, как хорошо известно, поверхностные потенциальные ямы, основанные на силах ван дэр Ваальса или (и) химических силах, имеют глубину

Конфигурации оптических нанополей типа “фотонная точка” в силу их симметрии имеют точки экстремума в потенциале взаимодействия атома с полем, где градиентная сила равна нулю. Такие нанополы естественно рассматривать как возможные ловушечные конфигурации [1,10]. При этом ловушечная конфигурация “фотонной точки” является устойчивой и истинно трехмерной (Рис.20), с характерным объемом локализации существенно меньше длины волны ($V \ll \lambda^3$), а локализованные атомы образуют атомную решетку с периодом, независимым от длины волны света.

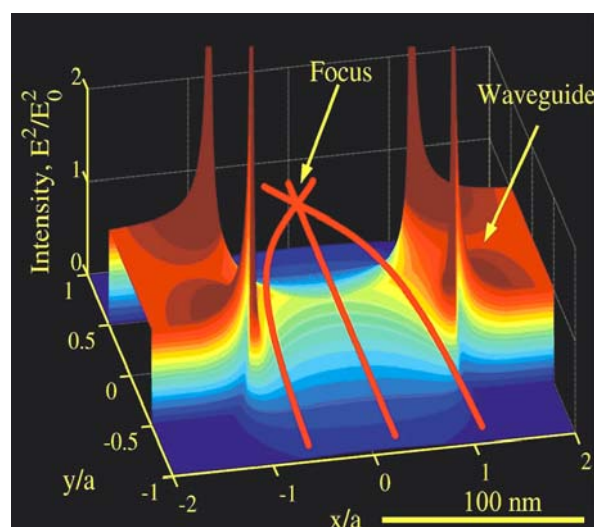


Рис. 21. Фокусировка атомного пучка “фотонной дыркой” [1].

порядка 10^1 - 10^3 К и поэтому способны удерживать нейтральные атомы со значительными кинетическими энергиями (например, самопроизвольная адсорбция атомов на поверхности из газовой фазы).

В лаборатории реализован новый тип ловушки для нейтральных атомов [14], основанной на поверхностной потенциальной яме - поверхностная нанолювушка. Загрузка атомов в ловушку основана на эффекте the energy-pooling collisions (рис.22,b). Показана возможность создания атомных микроструктур на поверхности с использованием поверхностной ловушки. Использование лазерных нанополей открывает возможность построения атомных наноструктур.

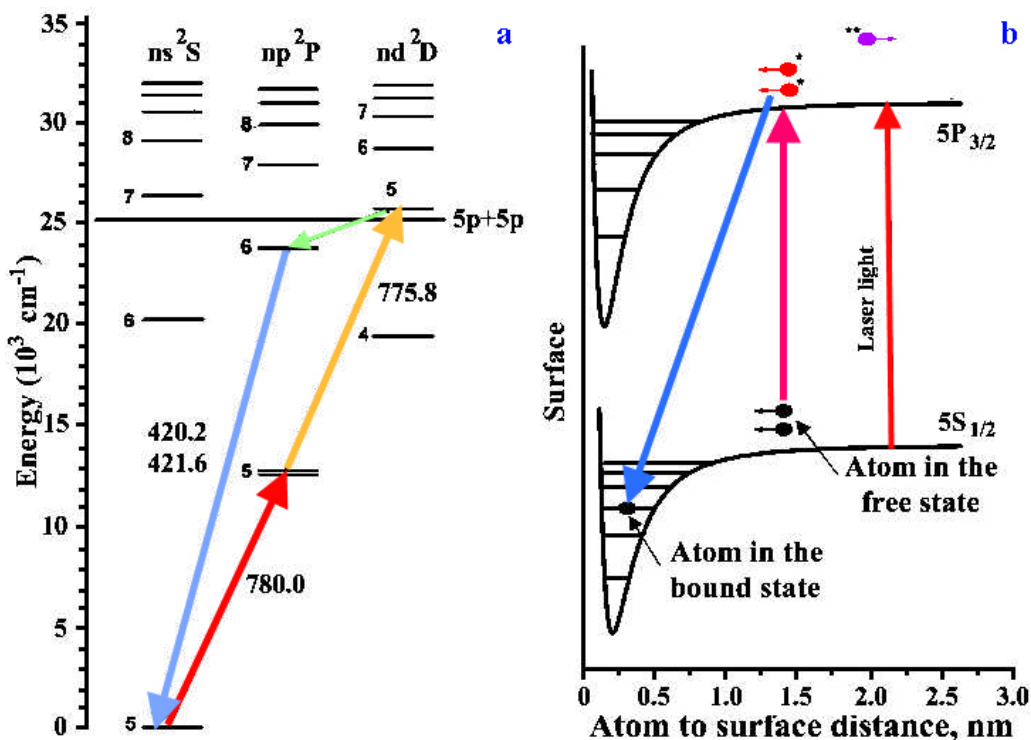


Рис. 22. Схема уровней атомов Rb и схема загрузки атомов в поверхностную нанолювучку [14].

Литература

1. V. I. Balykin, V.V. Klimov and V. S. Letokhov, "Atom Nano-Optics", Optics & Photonics News, **16**, 33-36, 2005.
2. В.И.Балыкин и др. Отражение светового пучка от градиента светового поля. Письма в ЖЭТФ, 45, 282 (1987); Phys. Rev. Lett. 60, 2137 (1988).
3. Seifert, W, Adams, C.S., Balykin V.I., et al. Reflection of metastable argon atoms from an evanescent-wave, Phys Rev, **A49**, 3814, 1994.
4. H. Oberst, Sh. Kasashima, V. I. Balykin, and F. Shimizu, "Atomic-matter-wave scanner", Phys. Rev. **A68**, 013606, 2003.
5. D. A. Lapshin, V.I. Balykin, V. S. Letokhov, " Diffraction of atoms by an evanescent wave grating formed by a periodic surface structure", Laser Physics, **7**, 361-368, 1997.
6. K. P. Nayak, P. N. Melentiev, M. Morinaga, Fam Le Kien, V. I. Balykin, and K. Hakuta Optical nanofiber as an efficient tool for manipulating and probing atomic fluorescence, Optics Express, **15**, 5431 (2007).
7. V. I. Balykin, K. Hakuta, Fam Le Kien, J. Q. Liang, and M. Morinaga, "Atom trapping and guiding with a subwavelength-diameter optical fiber", Phys. Rev. **A70**, 011401(R), 2004.

8. Fam Le Kien, V. I. Balykin, and K. Hakuta „Atom trap and waveguide using a two-color evanescent light field around a subwavelength-diameter optical fiber”, Phys.Rev. **A70**, 063403 (2004).
9. Fam Le Kien , J.Q. Liang , K. Hakuta , and V.I. Balykin, "Field intensity distributions and polarization orientations in vacuum-clad subwavelength-diameter optical", Opt, Commun., **242**, 445, 2004.
10. V. I. Balykin, V. V. Klimov, and V. S. Letokhov, "Atom Nanooptics Based on Photon Dots and Photon Holes", JETP Lett., **78**, 8, 2003.
11. . K. P. Nayak, P. N. Melentiev, M. Morinaga, Fam Le Kien, V. I. Balykin, and K. Hakuta, Optical Nanofibers for Manipulating and Probing Single-Atom Fluorescence, [arXiv:quant-ph/0610136](https://arxiv.org/abs/quant-ph/0610136).
12. V.I.Balykin, V.G.Minogin, V.S.Letokhov. Rep. Prog. Phys. 63, 1429 (2000).
13. V.Minogin et al. Phys. Reports, **365**, 65 (2002)
14. A. E. Afanasiev, P. N. Melentiev, and V. I. Balykin, Laser-Induced Quantum Adsorption of Atoms on a Surface, JETP Lett, **86**, 172 (2007).

Атомная нанолитография

В настоящее время полупроводниковые приборы микроэлектроники создаются главным образом методом оптической литографии. Создание структур с меньшими размерами является технологической задачей, имеющей как практическое значение, так и представляющей фундаментальный интерес, поскольку создание структур с размерами в области порядка 10 нм образует мост между классическим и квантовым миром. Существует несколько подходов в реализации наноструктур с размерами в несколько десятков нанометров, каждый из которых обладает как достоинствами так и недостатками.

Среди многих применений атомной оптики - *атомная литография* - потенциально важна для микро и нанофабрикации материальных структур. В атомной литографии внутренние и внешние степени свободы индивидуальных атомов контролируются с нанометровой точностью внешними электромагнитными полями и нанообъект "собирается" из индивидуальных атомов, молекул, биологических клеток и т.п.

Поскольку этот метод использует нейтральные атомы, то он обладает рядом преимуществ по сравнению с другими методами. Прежде всего, в данном методе весьма малым является фундаментальный предел пространственного разрешения, накладываемый дифракцией, поскольку атомы имеют относительно большие массы и, соответственно, малые де-Бройлевские длины волн. Кроме того, поскольку используются нейтральные атомы, то отсутствуют кулоновские силы отталкивания. Наконец, манипулирование атомами может быть реализовано параллельно, что позволяет одновременную обработку относительно больших поверхностей.

(а) Атомная наноперьевая нанолитография

Наноперьевая литография - это способ построения произвольных структур на поверхности, в точности аналогичный написанию на бумаге чернильной линии с помощью перьевой ручки. Чтобы сделать такие линии в наномасштабе, необходимо создать наноручку. Первые наноручки в качестве пера использовали зонды атомного силового микроскопа. В таком методе нанолитографии резервуар чернил-атомов хранится на кончике сканирующего зонда, который передвигается по поверхности, оставляя за собой линии атомных размеров. Серьезным недостатком метода является большая длительность процесса создания наноструктур.

Предложенное и реализованное нами *атомное перо* [1,2], представляет собой нанометровое отверстие в экране на который падает атомный пучок. Число отверстий может быть очень большим ($\sim 10^7$), что позволяет осуществлять параллельную нанофабрикацию атомов. Перемещение наноотверстия позволяет создать наноструктуры произвольного профиля. Нами было продемонстрирована возможность создания наноструктур из атомов *Cr*, *Ag* и *In* с помощью атомного нанопера. Ширина образованных наноструктур на полувысоте составляет 50 нм.

(b) Атомная камера-обскура с нанометровым разрешением

В лаборатории впервые экспериментально реализован иной подход к проблеме фокусировки и построения изображения в атомной оптике, основанный на идее «камеры-обскуры», используемой как в световой оптике так и в современной экспериментальной физике в тех случаях, когда создание фокусирующего потенциала затруднительно [1,2]. В оптике «камера-обскура» – это камера без линзы. Формирующее изображение свет проходит через малое отверстие. Для получения достаточно четкого изображения апертура такой камеры должна быть отверстием малого диаметра.

В атомной «камере-обскуры» пучок атомов пропускается через металлическую маску, формируя таким образом «светящийся объект» заданной геометрии (рис.23). Атомы, прошедшие через маску, поступают на трековую мембрану, содержащую большое количество ($3 \cdot 10^7 \text{ см}^{-2}$) отверстий с диаметром 50 нм. Каждое из отверстий является «камерой-обскурой», формирующей своё индивидуальное изображение «объекта» на поверхности подложки, размещённой на расстоянии 5 мкм. В результате, на подложке формируется массив идентичных наноструктур. На рис.24 показана экспериментальная установка – «атомная камера обскуры».

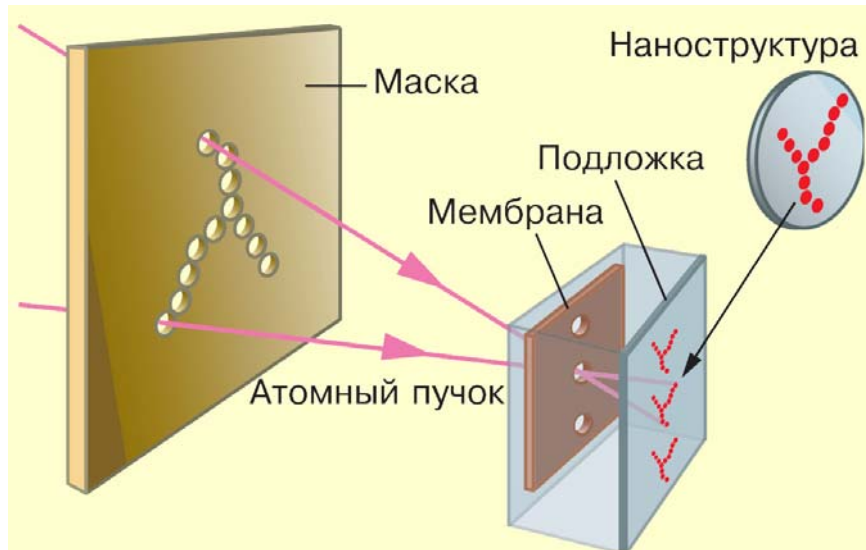


Рис. 23. В атомной «камере-обскуры» пучок атомов пропускается через маску, формируя таким образом «светящийся объект» заданной геометрии. Каждое из отверстий мембраны является «камерой-обскурой», формирующей изображение «объекта» на поверхности подложки.

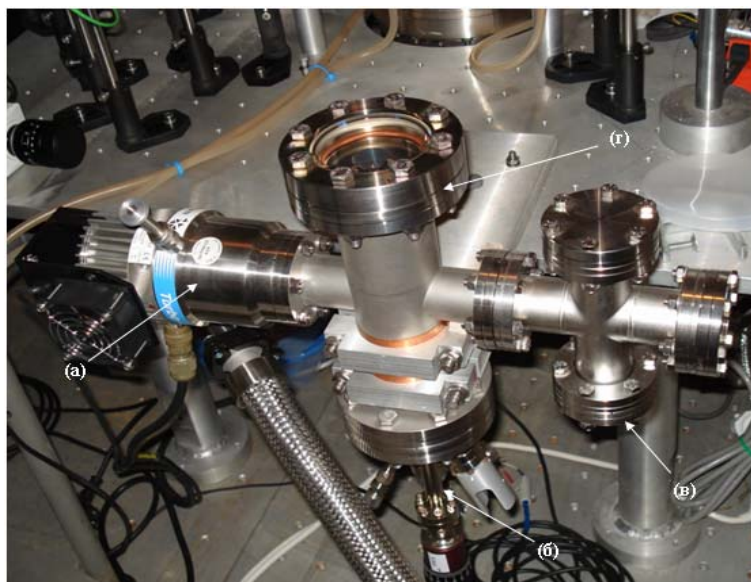


Рис. 24. Фотография атомной камеры обскура. На фотографии: (а) турбомолекулярный насос, (б) тепловой источник атомов или молекул, (в) измеритель вакуума, (г) высоковакуумная камера с атомной «камерой обскуры».

На рис.25 представлены наноструктуры атомов In на поверхности кремния полученные с помощью атомной «камеры-обскуры», в которой «маска-объект» была в виде полосок. Наноструктуры исследовались с помощью сканирующего атомно-силового микроскопа. Справа показано детальное изображение одного из изображений. Ширина на полувысоте наноструктуры составляет значение 90 нм. Минимальный размер создаваемых наноструктур с помощью атомной камеры обскур составляет величину порядка 30 нм.

Развитие методов атомной оптики открывает путь к литографии с атомным разрешением.

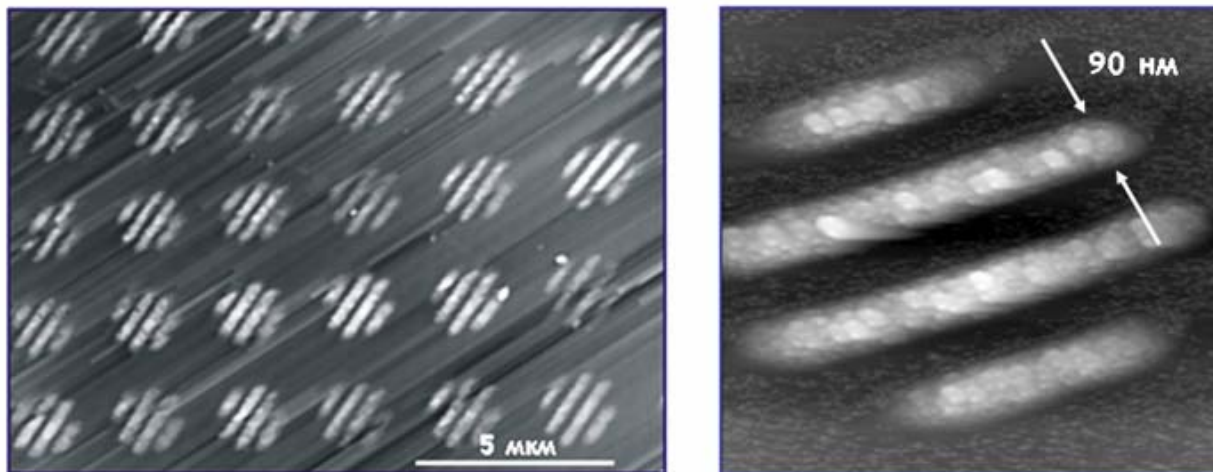


Рис. 25. Наноструктуры атомов In на поверхности кремния.

Литература

1. V. I. Balykin, P. A. Borisov, V. S. Letokhov, P. N. Melent'ev, S. N. Rudnev, A. P. Cherkun, A. P. Akimenko, P. Yu. Apel, and V. A. Skuratov, JETP Lett., **84**, 466-469, 2006.
2. V.I. Balykin, Parallel fabrication of nanostructures via atom projection, Physics – Uspekhi, **50**, (7) 744 (2007).

3. V. I. Balykin, V. G. Minogin, Focusing of an Atomic Beam by a Fresnel Atom Microlens, JETP, **105**, 479-485, 2007.

Ретроспективно можно сказать, что главным стержнем работы лаборатории лазерной спектроскопии в течение 40 лет был теоретический и экспериментальный поиск новых подходов в достижении предельных характеристик оптической спектроскопии с использованием лазерного света:

- 1) ультравысокого **спектрального** разрешения (методы нелинейной спектроскопии, охлаждения и пленения атомов, многофотоэлектронная регистрация);
- 2) ультравысокого **временного** разрешения (методы пико- и фемтосекундной спектроскопии);
- 3) ультравысокой **чувствительности** детектирования атомов и молекул (вплоть до одиночных атомов и молекул);
- 4) предельно высокой **избирательности** детектирования атомов и молекул, в частности, ультраредких изотопов на фоне основных изотопов;
- 5) предельно высокого **пространственного** разрешения (гораздо лучше дифракционного предела), вплоть до визуализации атомов, молекул, поглощающих центров.

Монографии

1. а) В.С.Летохов, В.П.Чеботаев. Принципы нелинейной лазерной спектроскопии. (Изд. Наука, Москва), 1975. б) V.S.Letokhov, V.P.Chebotaev. Nonlinear Laser Spectroscopy (Springer-Verlag, Berlin), 1977.
2. V.S.Letokhov. Laserspektroskopie (Akademic-Verlag, Berlin), 1977.
3. а.) В.С.Летохов. Нелинейные селективные фотопроецессы в атомах и молекулах (Физматгиз, Москва), 1983. б) V.S.Letokhov. Nonlinear Laser Chemistry with Multiple-Photon Excitation (Springer-Verlag, Berlin), 1983
4. а) В.П.Жаров, В.С.Летохов. Лазерная оптико-акустическая спектроскопия (Наука, Москва), 1984; б) V.P.Zharov, V.S.Letokhov. Laser Optoacoustical Spectroscopy (Springer-Verlag, Berlin), 1986.
5. а) Лазерная аналитическая спектроскопия. Под ред. В.С.Летохова (Наука, Москва), 1986. б) Laser Analytical Spectrochemistry, ed. by V.S.Letokhov (Adam Hilger, Bristol), 1986.
6. а) В.Г.Миногин, В.С.Летохов, Давление лазерного излучения на атомы (Наука, Москва), 1986; б) V.G.Minogin, V.S.Letokhov. Laser Light Pressure on Atoms (Gordon and Breach, New York), 1986.
7. а) В.С.Летохов. Лазерная фотоионизационная спектроскопия. (Наука, Москва), 1987. б) V.S.Letokhov. Laser Photoionization Spectroscopy (Academic Press, Orlando), 1987.
8. В.С.Летохов и В.П.Чеботаев. Нелинейная лазерная спектроскопия сверхвысокого разрешения. (Наука, Москва), 1990.
9. V.I.Balykin, V.S.Letokhov, Atom Optics with Laser Light. (Harwood Acad. Publ., Chur).
10. V.S.Letokhov, Laser Control of Atoms and Moleculars, 2008.

Лаборатория спектроскопии возбужденных состояний молекул



Лаборатория была организована в 1970 г., вначале как сектор, который позднее был преобразован в лабораторию. Первым руководителем сектора, а потом лаборатории был д.ф.-м.н. Р.В.Амбарцумян, с 1984 г. ее возглавляет д.ф.-м.н. Е.А.Рябов. В настоящее время (2008 г.) в постоянном штате состоит десять научных сотрудников.

С момента своей организации основным полем деятельности лаборатории было изучение возбужденных состояний многоатомных молекул. В значительной мере это было обусловлено необходимостью разработки методов селективного лазерного воздействия на молекулы, в частности, создания методов лазерного разделения изотопов.

Развитие молекулярного направления в лазерном разделении изотопов (MLIS) и связанные с этим фундаментальные исследования по спектроскопии возбужденных состояний молекул в течение продолжительного времени являлись основным направлением работы лаборатории. На всем протяжении эти работы велись в тесном сотрудничестве с лабораторией лазерной спектроскопии.

Исследования по программе MLIS с самого начала были ориентированы на использование колебательных переходов для селективного возбуждения молекул. Этот выбор определялся существенной индивидуальностью ИК спектра различных молекул, проявлением в нем значительного изотопного сдвига. Развитие этого направления привело к созданию двух наиболее перспективных методов MLIS. Первый метод основан на двухступенчатой ИК-УФ диссоциации молекул. Впервые он был успешно реализован в экспериментах по лазерному разделению изотопов азота (рис.1) при диссоциации NH_3 (Р.В.Амбарцумян, В.С.Летохов, Г.Н.Макаров, А.А.Пурецкий, 1972 г.) [1].

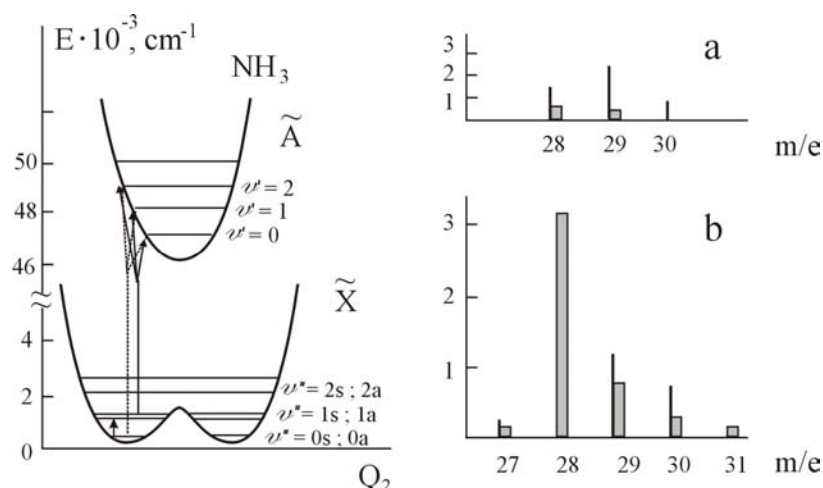


Рис. 1.

Слева: схема изотопически-селективной двухступенчатой фотодиссоциации молекул аммиака. Селективно возбужденные ИК лазерным излучением молекулы диссоциируют УФ излучением. Справа: результаты по лазерному разделению изотопов азота. Масс-спектры N_2 при:
(а) неселективной фотодиссоциации смеси $^{14}\text{NH}_3 + ^{15}\text{NH}_3$ (соотношение 1:1) и
(б) селективной (по $^{15}\text{NH}_3$) двухступенчатой фотодиссоциации смеси.

Практически одновременно с первым методом начал разрабатываться второй подход, основанный на ИК многофотонной диссоциации молекул (ИК МФД). Эффект изотопической селективности ИК МФД был впервые продемонстрирован (рис. 2) в экспериментах с молекулами $^{10}\text{BCl}_3$ и $^{11}\text{BCl}_3$ (Р.В.Амбарцумян, В.С.Летохов, Е.А.Рябов, Н.В.Чекалин, 1974 г.) [2]. Сразу после этого были проведены эксперименты по макроскопическому обогащению изотопов серы (рис. 3) при ИК МФД SF_6 [3].

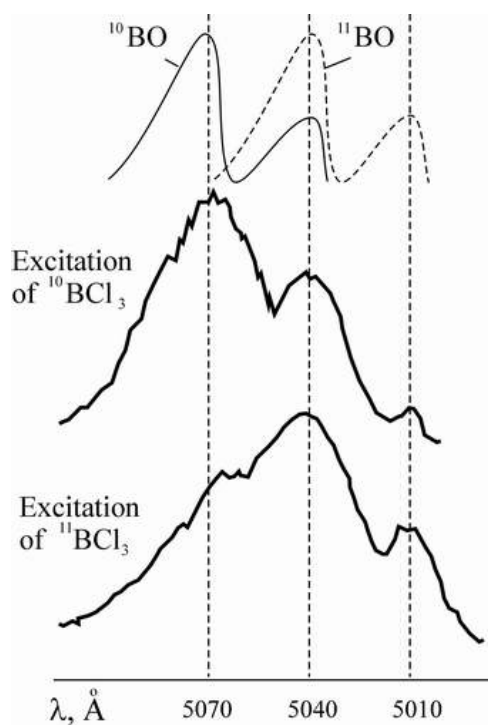


Рис.2. Наблюдение изотопической селективности ИК МФ диссоциации молекул: хемилюминесценция радикала BO^* при облучении CO_2 -лазером смеси $^{10}\text{BCl}_3$ и $^{11}\text{BCl}_3$ в присутствии кислорода. Вверху приведены модельные спектры радикалов ^{10}BO и ^{11}BO в отдельности.

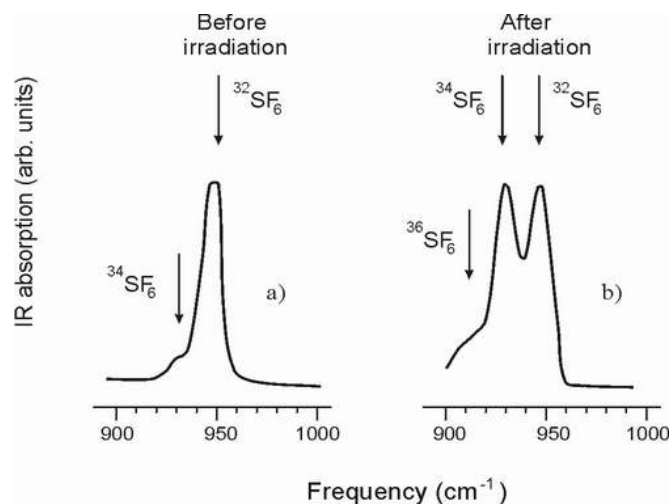


Рис. 3.

Обогащение газа SF_6 изотопами $^{34}\text{SF}_6$ и $^{36}\text{SF}_6$ за счет ИК МФД молекул $^{32}\text{SF}_6$ излучением CO_2 -лазера, наблюдаемое по спектру ИК-поглощения: (а) ИК спектр до облучения; (б) после облучения.

После первых успешных демонстраций был проведен большой цикл исследований селективного лазерного возбуждения молекул. Особое внимание было уделено изучению механизма ИК МФ возбуждения (ИК МФВ) молекул, а также причин, определяющих изотопическую селективность этого процесса. Полученные результаты отражены в ряде монографий и обзоров [4-9]. Одновременно, совместно с рядом организаций (ТРИНИТИ, НИИ стабильных изотопов, НИИЭФА им. Д.В.Ефремова) велись работы по масштабной реализации процесса на основе ИК МФД. Все это позволило разработать промышленную технологию лазерного разделения изотопов углерода на основе ИК МФД молекул CF_2HCl излучением импульсного CO_2 -лазера. Используя эту технологию, в компании «Газ-Ойл» (г. Калининград) был создан опытный завод по производству углерода ^{13}C [10, 11]. Блок-схема одного из модулей этого завода приведена на рис. 4.

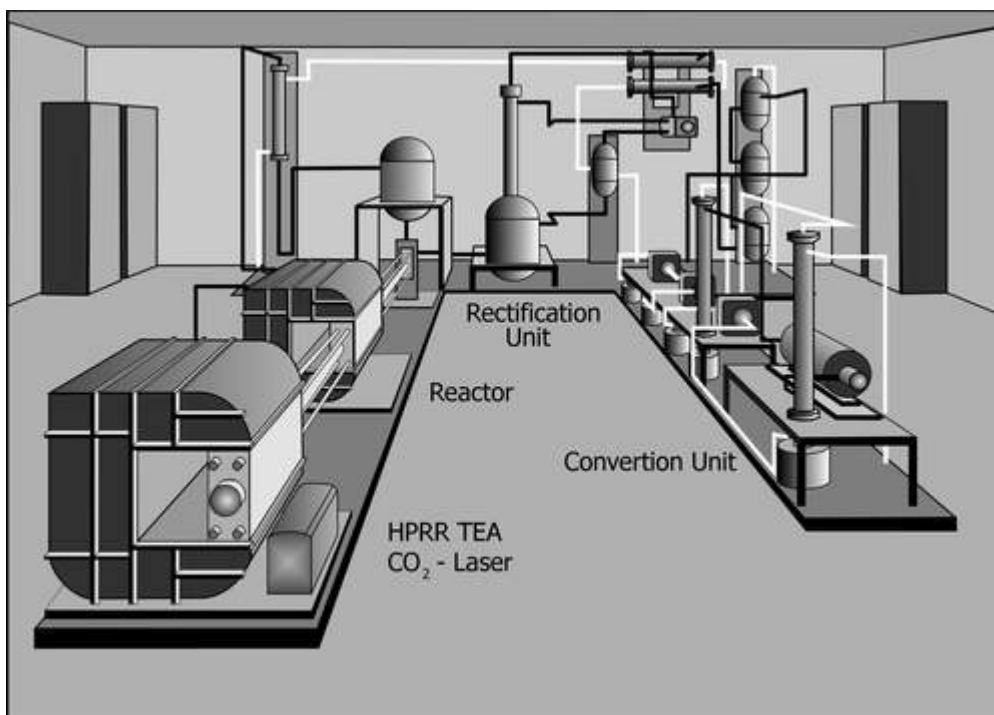


Рис. 4.

Блок-схема одного из модулей завода по лазерному разделению изотопов углерода. Модуль состоит из импульсно-периодического CO_2 -лазера (средняя мощность – до 1,8 кВт); разделительного реактора; блока выделения обогащенного продукта; блока конверсии последнего в конечный продукт – $^{13}\text{CO}_2$.

Производительность такого модуля составляет ~ 1 гр/час углерода ^{13}C с обогащением от природного содержания 1,108% до 40÷50%. При необходимости, дальнейшее обогащение до 99% может производиться традиционными методами. За разработку физико-технических основ лазерного разделения изотопов методом селективной многофотонной диссоциации молекул группе российских ученых, в т.ч. сотрудникам ИСАН проф. В.С. Летохову и проф. Е.А. Рябову, присуждена Государственная премия РФ за 2002 г. В настоящее время в рамках этой программы продолжаются работы, направленные как на дальнейшее развитие методов и технологий лазерного разделения изотопов, так и на разработку других технологических процессов, в т.ч. направленного лазерного химического синтеза [12] (к.ф.-м.н. В.Б.Лаптев и другие).

Наряду с исследованием изотопически селективного ИК МФ возбуждения и диссоциации молекул, в лаборатории в 1980-х г.г. была выполнена программа исследований по спектроскопии колебательных состояний вблизи и выше границы диссоциации. Изучались также процессы обратной электронной релаксации, динамика мономолекулярного распада молекул. В частности, впервые была измерена форма линии ИК поглощения для молекул сильно перевозбужденных (до двух раз) над границей диссоциации [13]. Некоторые итоги этих исследований были подведены в коллективных монографиях [14, 15].

В последующем фундаментальные исследования в лаборатории велись по следующим основным направлениям:

1. Спектроскопия возбужденных состояний молекул в молекулярных пучках (д.ф.-м.н. Г.Н.Макаров, д.ф.-м.н. Е.А.Рябов и др.).

Используя технику двойного ИК-ИК резонанса, выполнен цикл работ по изучению ИК МФВ в области дискретного спектра ниже границы квазиконтинуума, что позволило значительно продвинуться в понимании этого процесса [16].

Предложен ряд новых методов управления параметрами интенсивных импульсных молекулярных пучков (длительностью импульсов и кинетической энергией молекул в них). Разработан принципиально новый метод получения ускоренных нейтральных импульсных молекулярных пучков с управляемой ИК лазерным излучением кинетической энергией. Эффект основан на ИК МФ возбуждении молекул и последующей передаче энергии колебательного возбуждения в поступательные степени свободы. Указанный метод позволяет получать молекулярные пучки с кинетической энергией в диапазоне примерно от 0,1-0,2 эВ до 2-3 эВ [17, 18]. Этот эффект позволяет также получать и пучки холодных радикалов.

Выполнены исследования многофотонной ионизации и фрагментации молекул и радикалов под действием интенсивного УФ излучения. Используя эффект УФ МФИ, исследованы спектры УФ поглощения колебательно сильно возбужденных молекул ($\sim 15\ 000\ \text{см}^{-1}$) молекул SF_6 [19], изучена кинетика мономолекулярного распада ряда молекул и скоростное распределение образующихся радикалов [19, 20].

2. Проблемы формирования селективности ИК МФВ

Выполненные исследования существенно улучшили понимание механизмов формирования селективности ИК МФД. Это позволило, в частности, достичь рекордных значений изотопической селективности ИК МФД $\sim 10^4$ (д.ф.-м.н. А.А.Пурецкий и др.) [21]. Ведутся исследования изотопической селективности ИК МФД в условиях газодинамического охлаждения в молекулярных пучках [20, 22], в том числе, при взаимодействии пучков с твердой поверхностью [22]. В последнем случае можно значительно уменьшить потери радикалов, образующихся при ИК МФД.

3. Молекулярная динамика и колебательный энергообмен (д.ф.-м.н. Е.А.Рябов, д.ф.-м.н. А.А.Макаров и др.).

Методами спектроскопии КР с временным разрешением (см. рис. 5) исследовались процессы перераспределения энергии в высоковозбужденных колебательных состояниях многоатомных молекул. Показано, что внутримолекулярная колебательная релаксация (IVR), возникающая при стохастизации колебательного движения, приводит к равновесному перераспределению энергии по всем колебательным модам даже при резонансном воздействии на одну из них. Обнаружено наличие энергетической границы стохастизации E_{st} и впервые измерены ее значения для ряда молекул. В частности, для молекул SF_6 и CF_3Br значения E_{st} оказались равными $5000\ \text{см}^{-1}$ и $7500\ \text{см}^{-1}$ соответственно (глава 2 в [14, 15] и [24]).

Было обнаружено также [25], что внутримолекулярные взаимодействия могут существенно (на порядки) ускорять скорость *столкновительной* колебательной релаксации в многоатомных молекулах. В ряде случаев колебательная релаксация даже при столкновениях с одноатомными газами происходит всего за несколько столкновений [26]. Дана теоретическая интерпретация этого эффекта [26].

Выполнены исследования процессов внутримолекулярного перераспределения колебательной энергии (IVR) в пикосекундном временном диапазоне [27,28]. Проведены прямые измерения динамики изменения населенности колебания С–Н ацетиленовой связи после ее возбуждения коротким (~30 пс) импульсом ИК излучения в ряде молекул – производных ацетилена (рис. 5). Зондирование исследуемого колебания осуществлялось с использованием спектроскопии антистоксова комбинационного рассеяния света с пикосекундным разрешением. Измеренные скорости IVR из этого колебания оказались в диапазоне 10^9 – 10^{10} с⁻¹. Для ряда молекул обнаружен факт неполной релаксации этого колебания. На основании теоретического анализа экспериментальных результатов сделан вывод, что динамика IVR для этого класса молекул в значительной мере определяется колебательно–вращательным перемешиванием [28].

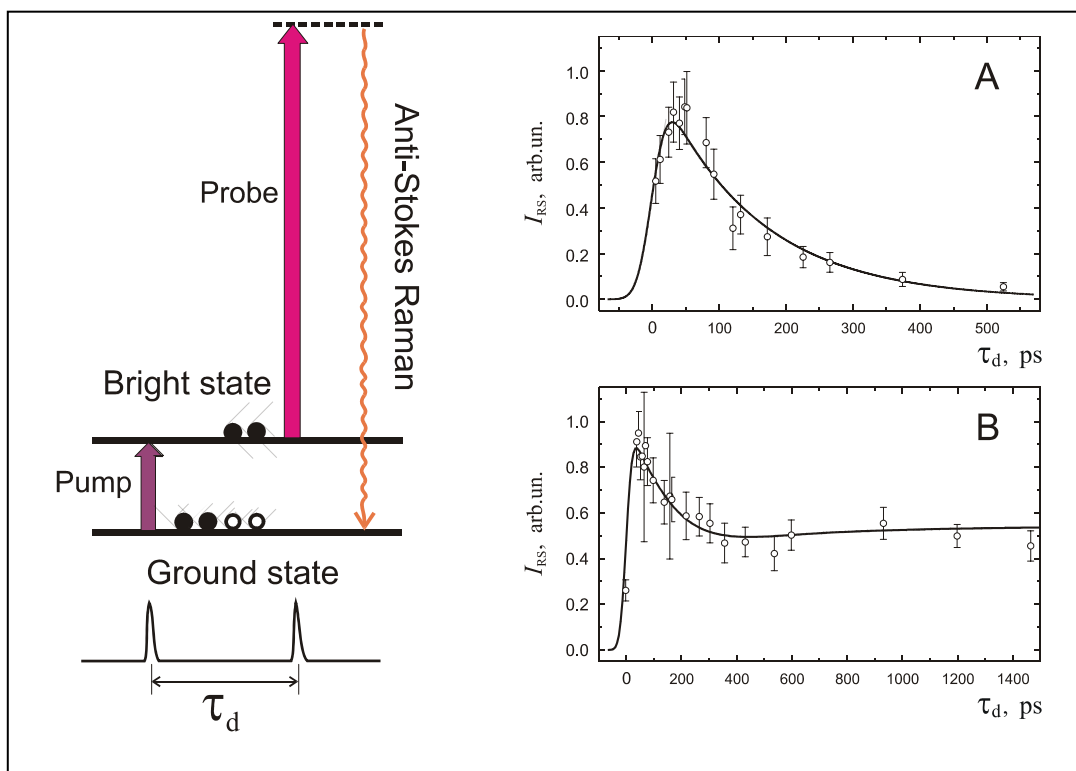


Рис. 5.

Исследование внутримолекулярной динамики и колебательного энергообмена в многоатомных молекулах. Слева – методика КР зондирования с временным разрешением. Справа – кинетика внутримолекулярной релаксации (IVR) при пикосекундном возбуждении колебания С–Н ацетиленовой связи в молекулах HCCN (А) и HCCCH_3 (В). Отчетливо виден неполный характер IVR для молекулы пропина (В).

Начаты исследования внутримолекулярной динамики с использованием лазерных импульсов фемтосекундной длительности (совместно с лабораторией спектроскопии ультрабыстрых процессов). Проведены эксперименты по диссоциации молекул CF_2HCl интенсивным ($4 \cdot 10^{13}$ – $2 \cdot 10^{14}$ Вт/см²) фемтосекундным излучением в ближней ИК области (0,8–1,8 мкм) [29]. Обнаружен распад этих молекул, причем оказалось, что состав конечных продуктов в этом случае существенно отличается от случая диссоциации этих молекул УФ или ИК излучением наносекундной длительности. Начаты эксперименты по ИК МФ возбуждению и диссоциации молекул при резонансном воздействии фемтосекундным излучением на их фундаментальные колебания [30].

4. Спектроскопия колебательного квазиконтинуума (д.ф.-м.н. Е.А.Рябов, д.ф.-м.н. А.А.Макаров и др.)

Выполнен цикл исследований, направленный на изучение спектральных свойств (форма, положение, интенсивность ИК и КР переходов) колебательного квазиконтинуума в многоатомных молекулах. На примере сферических волчков типа XY_6 показано, что основную роль в формировании формы полосы переходов играют неоднородное статистическое уширение и однородное уширение. Первое ведет к гауссовой форме полосы, второе – к лоренцевой. Разработана теория расчета спектров колебательных переходов в многоатомных молекулах, когда доминирующую роль играет статистическое неоднородное уширение [31]. Выполненные измерения показали ее хорошее согласие с экспериментом [32, 33]. Разработана методика и на примере молекулы SF_6 впервые определена величина однородного уширения в широком диапазоне энергий [34]. На основании этих результатов разработана теоретическая модель, на количественном уровне описывающая процесс ИК МФ возбуждения и диссоциации [19].

5. Многофотонные процессы в кластерах, индуцированные ИК и УФ излучением (д.ф.-м.н. Е.А.Рябов и др.)

Ведутся исследования по спектроскопии молекулярных кластеров, в том числе – исследования многофотонных процессов под действием ИК и/или УФ излучения. Для получения кластеров используется сверхзвуковое истечение соответствующих молекул из импульсного сопла. Были разработаны и апробированы методы детектирования и диагностики кластерных пучков, которые включают ИК фотодиссоциацию кластеров, а также их УФ многофотонную ионизацию (МФИ) в сочетании с времяпролетной масс-спектрометрией (рис. 6).

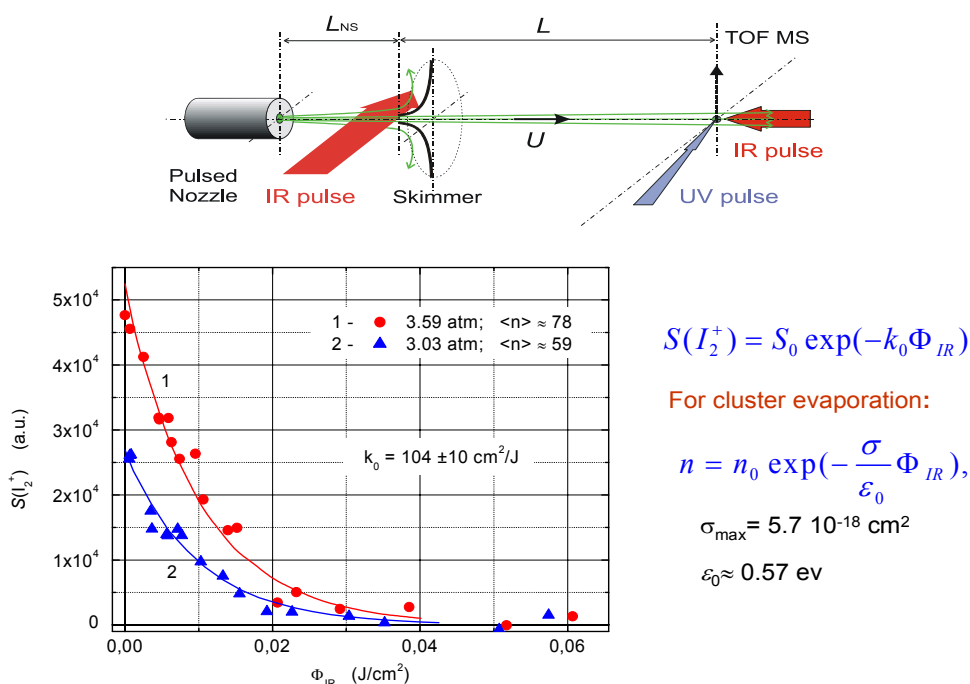


Рис. 6. Исследование многофотонных процессов в кластерных пучках. Вверху – схема эксперимента. УФ МФИ кластеров происходит на оси времяпролетного масс-спектрометра. ИК диссоциация кластеров может производиться как в области ионизации, так и вне ее - перед скиммером. В последнем случае фотодиссоциационная “метка” используется для измерения скоростных характеристик кластеров. Внизу – зависимость эффективности ИК многофотонной диссоциации кластеров $(\text{CF}_3\text{I})_n$ от плотности энергии ИК излучения Φ_{IR} для двух значений среднего размера кластеров $\langle n \rangle$. Отчетливо виден экспоненциальный спад кластерного сигнала $S(I_2^+)$ с ростом Φ_{IR} .

Проведены исследования УФ и ИК многофотонных процессов в кластерах $(\text{CF}_2\text{HCl})_n$ [35,36] и $(\text{CF}_3\text{I})_n$ [37]. Выполненные исследования позволили определить значения основных характеристик кластеров, таких как их средний размер $\langle n \rangle$ и средняя скорость направленного движения U , поперечная и продольная составляющие скорости теплового движения, степень кластеризации пучка. Выполнены детальные исследования УФ МФИ свободных молекул и кластеров CF_2HCl и CF_3I . На основании полученных данных предложен механизм УФ МФИ исследуемых частиц. При УФ МФИ (308 нм) кластеров $(\text{CF}_3\text{I})_n$ обнаружено образование ионов I_2^+ . Показано, что эти ионы появляются в результате *внутрикластерных* реакций.

Начаты исследования внутрикластерной динамики и кинетики “мономолекулярного” распада кластеров [37]. С этой целью исследована ИК многофотонная диссоциация кластеров $(\text{CF}_3\text{I})_n$ при возбуждении входящих в него молекул CF_3I излучением импульсного (100 нс) CO_2 -лазера, резонансного одному из колебаний этой молекулы. Измерена эффективность диссоциации (рис. 6), а также кинетика распада в наносекундном диапазоне времени. Развита феноменологическая модель распада, которая хорошо описывает результаты измерений. На ее основе впервые определена энергия связи ε_0 молекул CF_3I в составе кластеров. Сделан вывод, что последовательное “испарение” молекул из кластеров по мере роста поглощенной энергии является, по-видимому, основным механизмом распада для исследованных кластеров – по крайней мере, для использованных значений интенсивности и длительности ИК импульсов.

Выполнен анализ и проведена систематизация работ по ряду направлений физики и спектроскопии кластеров (д.ф.-м.н. Г.Н. Макаров) [38, 39].

Кроме того, в связи с разработкой перестраиваемых источников излучения пико- и фемтосекундной длительности в среднем ИК диапазоне, выполнены исследования оптических и нелинейных свойств нелинейных кристаллов из семейства халькогенидов (к.ф.-м.н. В.Б. Лаптев, к.ф.-м.н. А.Л. Малиновский и др.)

В своих исследованиях Лаборатория плодотворно сотрудничала с научными организациями в России и за рубежом, в том числе в рамках целого ряда международных проектов. Это, в частности, - ТРИНИТИ, НИИЭФА им Д.В.Ефремова (проекты ISTC), ФГУП “Астрофизика” и Кубанский Госуниверситет (проекты ISTC), Instituto de Optica (Madrid) and Oxford Univ. (проект INTAS), Univ. of Southern California (проект CRDF), Ecole Polytechnique Federale de Lausanne (проект SCOPES) и др. Кроме того, проводились исследования в рамках контрактов с рядом отечественных и зарубежных компаний

В настоящее время фундаментальные исследования продолжаются по следующим основным направлениям:

- Изучение внутримолекулярной динамики с использованием методов пикосекундной лазерной спектроскопии. Начаты исследования с использованием импульсов фемтосекундной длительности.
- Спектроскопия молекулярных кластеров, в том числе, исследование многофотонных процессов, индуцированных УФ и ИК лазерным излучением.
- Внутрикластерная динамика и мономолекулярный распад кластеров.
- Взаимодействие пучков колебательно возбужденных молекул с холодной поверхностью.

За истекшее время в лаборатории подготовлено и защищено пять докторских и пятнадцать кандидатских диссертаций.

На основании выполненных исследований опубликовано шесть монографий.

Монографии

1. R.V.Ambartzumian, V.S.Letokhov. "Multiple Photon Infrared Laser Photochemistry", in: Chemical and Biochemical Applications of Lasers, vol.3, Academic Press, New York, 1977.
2. В.Н.Баграташвили, В.С.Летохов, А.А.Макаров, Е.А.Рябов. «Многофотонные процессы в молекулах в инфракрасном лазерном поле». Изд-во ВИНТИ, Москва, 1981.
3. Е.П.Велихов, В.Ю.Баранов, В.С.Летохов, Е.А.Рябов, А.П.Старостин. «Импульсные CO₂ лазеры и их применение для разделения изотопов», Наука, Москва, 1983.
4. V.N.Bagratashvili, V.S.Letokhov, A.A.Makarov, E.A.Ryabov. "Multiple photon infrared laser photophysics and photochemistry". Harwood Acad. Publ., Chur, 1985.
5. "Laser spectroscopy of highly vibrationally excited molecules", ed. By V.S. Letokhov, Adam-Hilger, Bristol, 1989.
6. "Лазерная спектроскопия колебательно-возбужденных молекул". Под ред. В.С.Летохова, Наука, Москва. 1990.

Литература

1. Р.В.Амбарцумян, В.С.Летохов, Г.Н.Макаров, А.А.Пурецкий. Письма в ЖЭТФ **17**, №2, 91 (1973).
2. Р.В.Амбарцумян, В.С.Летохов, Е.А.Рябов, Н.В.Чекалин. Письма в ЖЭТФ **20**, 597 (1974).
3. Р.В.Амбарцумян, Ю.А.Горохов, В.С.Летохов, Г.Н.Макаров. Письма в ЖЭТФ **21**, 375 (1975).
4. R.V.Ambartzumian, V.S.Letokhov. "Multiple Photon Infrared Laser Photochemistry", in: Chemical and Biochemical Applications of Lasers, vol.3, Academic Press, New York, 1977.
5. В.Н.Баграташвили, В.С.Летохов, А.А.Макаров, Е.А.Рябов. «Многофотонные процессы в молекулах в инфракрасном лазерном поле», Изд-во ВИНТИ, Москва, (1981).
6. Е.П.Велихов, В.Ю.Баранов, В.С.Летохов, Е.А.Рябов, А.П.Старостин. «Импульсные CO₂ лазеры и их применение для разделения изотопов», Наука, Москва, (1983).
7. V.N.Bagratashvili, V.S.Letokhov, A.A.Makarov, E.A.Ryabov. "Multiple photon infrared laser photophysics and photochemistry". Harwood Acad. Publ., Chur, (1985).
8. V.S.Letokhov, E.A.Ryabov. "Laser Isotope Separation" in "Optics Encyclopedia", Wiley-VCH, Berlin, (2003).
9. В.С.Летохов, Е.А.Рябов. Глава 8.3 в: «Изотопы» т. I. Под ред. В.Ю.Баранова, ИздАТ, Москва, (2005).
10. V.Yu.Baranov, A.P.Dyad'kin, D.D.Malyuta, V.A.Kuzmenko, S.V.Pigulski, V.S.Mezhevov, V.S.Letokhov, V.B.Laptev, E.A.Ryabov, I.Yu.Yarovoi, V.B.Zarin, A.S.Podoryashy. Proceedings of SPIE, vol. 4165, p. 314-323 (2000).
11. В.Ю. Баранов, А.П. Дядькин, В.С. Летохов, Е.А. Рябов. Глава 8.4 в: «Изотопы» т. I. Под ред. В.Ю.Баранова, ИздАТ, Москва, (2005).
12. M. Polanski, O.V.Boyarkin, T.R.Rizzo, V.M.Apatin, V.B.Laptev, E.A.Ryabov. *J. Phys. Chem.*, **A107**, 8578-8583 (2003).

13. В.Н.Баграташвили, С.И.Ионов, В.С.Летохов, В.Н.Лохман, Г.Н.Макаров, А.А.Стучебрюхов. Письма в ЖЭТФ **44**, 450 (1986).
14. "Laser spectroscopy of highly vibrationally excited molecules", ed. By V.S. Letokhov, Adam-Hilger, Bristol, 1989.
15. Лазерная спектроскопия колебательно-возбужденных молекул. Под ред. В.С.Летохова. Наука, Москва, 1990.
16. Ю.А.Курицын, Г.Н.Макаров, И.Пак. М.В.Сотников. ЖЭТФ **94**, 65 (1988).
17. В.Н.Апатин, Г.Н.Макаров, В.В.Нестеров. Письма в ЖЭТФ **73**, 735 (2001).
18. Г.Н.Макаров. УФН **173**, №9 (2003).
19. V.N.Lokhman, A.A.Makarov, D.D.Ogurok, E.A.Ryabov, V.S.Letokhov. Chem. Phys. **286**, 385 (2003).
20. V.N.Lokhman, D.D.Ogurok, E.A.Ryabov. Chem. Phys. **271**, 357 (2001).
21. A.V.Evseev, V.S.Letokhov, A.A.Puretzky. Appl. Phys. **36B**, №2, 93 (1985).
22. Г.Н.Макаров. УФН **175**, №1 (2005).
23. Г.Н.Макаров, А.Н.Петин. ЖЭТФ **119**, 5 (2000).
24. A.L.Malinovsky, V.S.Letokhov, E.A.Ryabov. Chem. Phys. **139**, №1, 229 (1989).
25. А.А.Костерев, А.Л.Малиновский, Е.А.Рябов. Письма в ЖЭТФ **54**, 16 (1991).
26. А.А.Kosterev, A.A.Makarov, A.L.Malinovsky, E.A.Ryabov. Chem. Phys. **219**, 305 (1997).
27. A.L. Malinovsky, Yu.S. Doljikov, A.A. Makarov, N.-D.D. Ogurok, E.A. Ryabov. *Chemical Physics Letters*, v. 419, p. 511-516 (2006).
28. А.Л.Малиновский, А.А.Макаров, Е.А.Рябов. ЖЭТФ, **133**, 45-58 (2008).
29. V.M. Apatin, V.O. Kompanets, V.B. Laptev, Yu.A. Matveets, E.A. Ryabov, S.V. Chekalin, V.S. Letokhov. *Chemical Physics Letters*, v. 414, p. 76-81 (2005).
30. В.М. Апатин, В.О. Компанец, В.Б. Лаптев, Ю.А. Матвеец, Е.А. Рябов, С.В. Чекалин, В.С. Летохов. *Химическая Физика*, т.26, № 4, с. 18-25 (2007).
31. A.A.Makarov, I.Yu.Petrova, E.A.Ryabov, V.S.Letokhov. J. Phys. Chem. **102**, 1438 (1998).
32. A.L.Malinovsky, I.Yu.Petrova, A.A.Makarov, E.A.Ryabov, V.S.Letokhov. J. Phys. Chem. **102A**, 9353 (1998).
33. A.A.Kosterev, A.A.Makarov, A.L.Malinovsky, I.Yu.Petrova, E.A.Ryabov, V.S.Letokhov. J. Phys. Chem. **104A**, 10259 (2000).
34. V.N.Lokhman, A.A.Makarov, I.Yu.Petrova, E.A.Ryabov, V.S.Letokhov. J. Phys. Chem. **103A**, 11299 (1999).
35. В.Н. Лохман, Д.Д. Огурок, Е.А. Рябов. ЖТФ **75**, 29 (2005).
36. В.Н. Лохман, Д.Д. Огурок, Е.А. Рябов. ЖЭТФ, **130**, №1, 1 (2006).
37. V.N.Lokhman, D.D.Ogurok, E.A.Ryabov. *Chemical Physics*, **333**, 25 (2007).
38. Г.Н. Макаров. УФН, **176** (2), 121 (2006).
39. Г.Н. Макаров. УФН, **178** (4), 335 (2008).

Лаборатория спектроскопии ультрабыстрых процессов



Работы по применению ультракоротких лазерных импульсов (УКИ) в научных исследованиях начались в Институте спектроскопии РАН в 1973 году с пикосекундными лазерами. Лаборатория спектроскопии ультрабыстрых процессов была организована в 1974 г. сначала как сектор пикосекундной спектроскопии под руководством д.ф.-м.н. П.Г.Крюкова. Первыми сотрудниками сектора были Ю.А.Матвеец, Д.Н.Никогосян, А.В.Шарков. С 1980 г. по 2002 г. лабораторию возглавлял к.ф.-м.н. Ю.А.Матвеец. В настоящее время руководителем лаборатории является д.ф.-м.н. С.В.Чекалин. В штате лаборатории 6 научных сотрудников.

С момента организации лаборатории ее деятельность была сконцентрирована в основном на двух направлениях: 1) исследование сверхбыстрых фотоиндуцированных процессов в веществе в конденсированной фазе и 2) селективное лазерное воздействие на вещество мощным сверхкоротким импульсом.

Для выполнения этих работ были созданы импульсные лазерные установки с длительностью сначала в пикосекундном (30–6 пс), а затем в фемтосекундном (300–20 фс) диапазонах, ставшие основными элементами пико- и фемтосекундных спектрометров. Первый в СССР фемтосекундный генератор УКИ на красителе был запущен в Институте спектроскопии РАН в 1979 году. Однако для создания усилителей и многоканальной системы регистрации, необходимых для проведения экспериментов по исследованию сверхскоростной динамики с фемтосекундным временным разрешением, потребовалось еще несколько лет. Кроме прогресса в уменьшении длительности (100–300 фс вместо 20 пс), существенно улучшилась воспроизводимость временной формы импульса, выходной энергии (разброс не более 10 %) и однородность распределения энергии в пучке. При энергии на выходе 1 мДж можно было достичь интенсивности до 10^{15} Вт/см² за счет фокусировки излучения, однако самофокусировка излучения в оптических элементах усилителя при таких энергиях сильно искажала временной профиль импульса и пространственное распределение энергии в пучке.

Наиболее важным результатом исследований физики генерации и усиления ультракоротких импульсов, полученным в лаборатории, явилось выяснение **влияния самофокусировки в активных средах на процессы генерации и усиления** [1–2]. В частности было показано, что именно самофокусировка, а не какие-либо другие нелинейные процессы, является главным ограничивающим фактором при усилении. В работе [1] о происхождении временной структуры генерируемых ультракоротких импульсов было экспериментально и теоретически показано, что основной причиной дробления импульса на более короткие фрагменты также является самофокусировка усиливаемого излучения в активном элементе, приводящая к практически безынерционному изменению расходимости с увеличением интенсивности вдоль временного профиля импульса. Этот

процесс, наблюдавшийся экспериментально и промоделированный в [1], был использован почти двадцатью годами позже для создания нового поколения фемтосекундных лазеров (так называемых KLM лазеров), получивших в настоящее время наиболее широкое распространение.

За период 1985-1995 гг в ИСАНе был проведен ряд исследований динамики релаксации возбуждений с фемтосекундным временным разрешением в различных объектах.

В экспериментах, проведенных с помощью созданных в лаборатории сверхскоростных спектрометров [3], исследовались первичные фотоиндуцированные процессы в различных биообъектах: реакционных центрах фотосинтеза бактерий [3-5], гематопорфирине [6], бактериородопсине [7-8]. Пико- и фемтосекундные импульсы большой мощности использовались также для исследования процессов при нестационарном нагреве лазерной плазмы [9-11]. Были обнаружены и промоделированы характерные для таких режимов нагрева **особенности рентгеновских спектров плазмы** [9]. Обнаружены также аномалии в интенсивностях некоторых линий NaIX и CVI в ВУФ и рентгеновской области при наблюдении вдоль и поперек оси плазменного шнура при двухступенчатом нагреве ультракороткими импульсами. Наблюдавшиеся аномалии связаны с **возникновением усиления при нестационарном нагреве** [10,11].

В лаборатории выполнен ряд работ по исследованию фотодесорбции ионов хромофор-содержащих молекул импульсами пикосекундной [12,13] и фемтосекундной [14,15] длительности с помощью масс-спектрометрии и визуализации десорбированных ионов в схеме лазерного фотоионного микроскопа. Впервые обнаружена **селективность фотоотрыва ионов красителя** и получены **селективные по ионам изображения** мест их вылета с увеличением порядка 1000 [13]. Важным результатом этих исследований явилось обнаруженное **снижение порога фотоотрыва иона при переходе к длительностям меньше пикосекунды**.

В цикле работ по исследованию бактериородопсина, было показано [7], что сразу после поглощения кванта света идет **процесс изомеризации ретиналя с характерным временем 0,5 пс, что приводит к образованию промежуточного продукта, имеющего время жизни 3 пс**. Эти экспериментальные факты дали важный вклад в понимание молекулярного механизма преобразования энергии света ретиналь-белковыми комплексами [7-8]. Исследование первичных фотоиндуцированных процессов в реакционных центрах пурпурных бактерий с временным разрешением $\sim 10^{-13}$ с позволило измерить **скорость миграции энергии между пигментами и определить первичный акцептор электрона в процессе преобразования энергии поглощенного кванта в энергию разделенных зарядов** [3-5].

Исследования по селективному воздействию на вещество были начаты в 1977 г. с экспериментов по ступенчатому селективному электронному возбуждению молекулы Родамина 6Ж в растворе D₂O через промежуточный колебательный обертоновый переход [16a]. Чрезвычайно высокое поглощение воды во всем ИК диапазоне не позволяет сделать этот метод эффективным. Поэтому следующим этапом исследований были успешные эксперименты по менее селективному, но более эффективному **многоступенчатому электронному возбуждению биомолекул (оснований нуклеиновых кислот) в водных растворах через синглетные уровни** [16b]. В этом же направлении были выполнены циклы работ по **многоступенчатой ионизации и диссоциации воды и водных растворов компонентов нуклеиновых кислот** [16b] и по **нелинейному фотохимическому синтезу аминокислот** [17].

С 1989 г. начаты исследования сверхбыстрых процессов в твердом теле, таких как релаксация возбужденных носителей заряда в полупроводниках [18-19], металлах [20-22], ВТСП-материалах [23-26], фуллеритах [27-36, 47-51], полимерах и других углерод-содержащих материалах [37,38,54], полупроводниковых микрополостях [39,53]. С 1996 г. совместно с ЦКБ УП проводятся эксперименты по **ахроматическому восстановлению волнового фронта** с помощью фемтосекундных лазерных импульсов [40,66-68]. По результатам этих работ в 2000 г. коллективу присуждена премия им. Ю.И. Островского ЛФТИ им. Иоффе за лучшую публикацию по голографической интерферометрии. Проведены также успешные эксперименты по **нанолиитографии** с помощью фемтосекундных лазерных импульсов [41] (совместно с лабораторией нанофизики), по **измерению времен релаксации когерентной поляризации** в конденсированных средах методом фемтосекундной интерференционной спектроскопии [42], а также по **проекционной фотоэлектронной микроскопии сверхвысокого пространственного разрешения** [43] и **невозмущающей визуализации света в ближнем поле** с помощью фемтосекундных импульсов [44,45] (совместно с лабораторией лазерной спектроскопии).

Для исследования динамики релаксации в различных фотовозбужденных объектах обычно используется метод возбуждения-зондирования в различных его модификациях. Упрощенная схема эксперимента (рис.1) такова: коротким возбуждающим импульсом длительностью менее 100 фс и интенсивностью от 10^8 до 10^{13} Вт/см² производится сильное возмущение исследуемого объекта (например, разогрев носителей заряда и отрыв температуры электронов от температуры решетки). С помощью слабого (невозмущающего) зондирующего импульса, можно наблюдать кинетику изменения спектра поглощения или отражения неравновесной системы, меняя задержку зондирования относительно возбуждения. Таким образом можно, например, следить за динамикой передачи энергии от электронной подсистемы фононам решетки. Зондирование должно производиться в как можно более широком спектральном диапазоне.

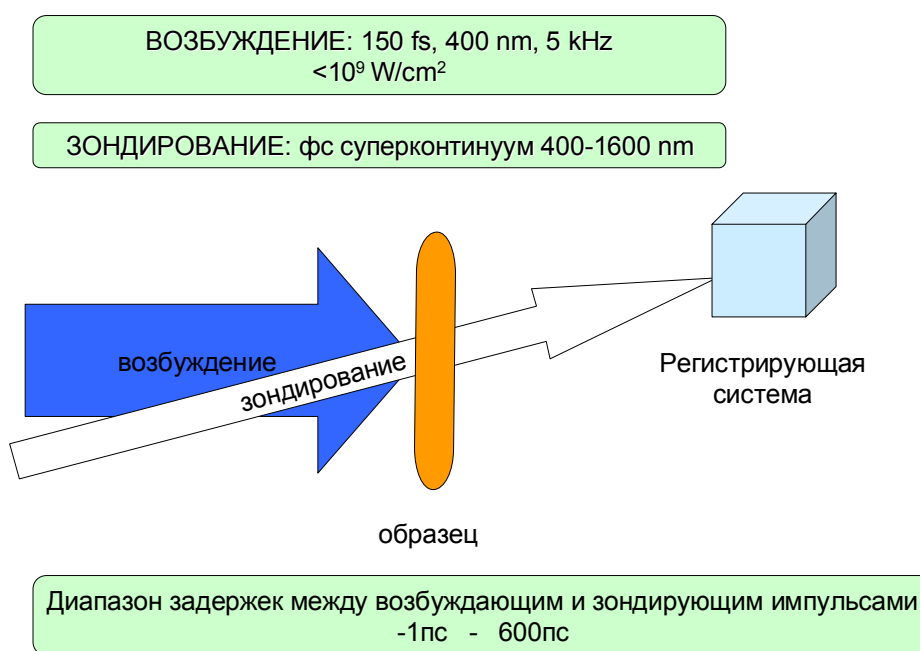


Рис.1. Схема эксперимента типа «возбуждение – зондирование».

По сравнению с другими спектроскопическими методами фемтосекундная оптическая спектроскопия обладает тем преимуществом, что позволяет исследовать динамику релаксации неравновесных носителей заряда и разделить

вклады неравновесных носителей заряда и фононов в изменение оптических свойств. В применении к металлам она позволяет выделить узкую спектральную область, соответствующую переходам из некоторой валентной зоны в окрестность уровня Ферми и наблюдать динамику изменения температуры носителей заряда и решетки [22,23,25].

За упомянутый период методом фемтосекундного возбуждения-зондирования выполнены следующие эксперименты:

- Проведены тестовые эксперименты по **измерению параметра электрон-фононного взаимодействия в металлах**. Исследован временной ход разностных спектров отражения и пропускания медных пленок в диапазоне 505-605 нм после возбуждения образца мощным 150-фс лазерным импульсом. Полученное значение [21,22] параметра $\lambda\langle\omega^2\rangle = (27\pm4)$ мэВ в пределах точности измерений согласуется с результатами других методов.

- Проведены исследования влияния различных механизмов электрон-фононного взаимодействия на скорость энергетической релаксации в полярных полупроводниках — в микрокристаллитах CdSSe в стеклянной матрице [18-19].

- С помощью исследования динамики спектров отражения и пропускания сверхпроводника при $T > T_c$ выделена спектральная область, соответствующая межзонным переходам на уровень Ферми. По релаксационной динамике спектров определен параметр электрон-фононного взаимодействия $\lambda\langle\omega^2\rangle \sim 500$ (мэВ)² (соответствующее $\lambda \approx 1$) [23-25]. Из оптических спектров ($\hbar\omega \gg \Delta$) при $T < T_c$ оценена величина сверхпроводящей щели $\Delta \sim 30$ мэВ [23].

Полученные данные относительно положения уровня Ферми, величины сверхпроводящей щели, величины параметра электрон-фононного взаимодействия находятся в хорошем согласии с результатами других экспериментальных методик и теоретических работ.

- Исследованы процессы энергетической релаксации неравновесных возбуждений в пленках C₆₀ в широкой спектральной области 1.0-3.6 eV [27-32,34,36,47].

При возбуждении и зондировании на одной и той же длине волны в такой постановке эксперимента в принципе невозможно обнаружить многокомпонентность исследуемой системы возбужденных молекул. В экспериментах с широкополосным зондированием исследована фемтосекундная динамика фотоиндуцированной оптической плотности сверхтонкой пленки C₆₀ и **обнаружена спектральная зависимость времени релаксации фотоиндуцированного отклика от длины волны зондирования** [27].

Анализ динамики изменения разностного спектра [36,47] показал, что в исследованном спектральном диапазоне можно выделить несколько областей, внутри которых кинетики распада одинаковы, а кинетики, снятые в разных областях, имеют существенно различный характер. Это означает, что одновременно существуют по меньшей мере 3 различных компонента, каждый из которых релаксирует со своей кинетикой.

Проведенные исследования показали, что при возбуждении пленок C₆₀ 100 фс импульсами на 645 нм (10^{10} - 10^{11} Вт/см²) и на 367 (345) нм (10^9 Вт/см²) **за время импульса образуются как первичные носители заряда - электроны проводимости и локализованные катионы, приводящие к возникновению**

локальных электрических полей в образце, так и нейтральные молекулы в возбужденном состоянии. Самые быстрые релаксационные процессы происходят с участием наиболее мобильных компонентов - электронов проводимости. При возбуждении выше порога подвижности (367 нм) первичные носители заряда возникают в результате прямого оптического возбуждения, а при возбуждении ниже порога подвижности (645 нм) - за счет двухфотонного поглощения, поэтому в последнем случае квантовый выход существенно ниже. Заметного проявления синглет-синглетной аннигиляции не наблюдалось в обоих случаях, поэтому аннигиляционные процессы не играют существенной роли в генерации носителей заряда.

- По временным изменениям оптической плотности пленки C_{60} исследовалось возбуждение когерентных фононов в диапазоне частот $10\text{--}400\text{ см}^{-1}$ [30]. Полное расщепление моды $H_g(1)$ внутримолекулярных колебаний фуллеренов C_{60} указывает на **значительную деформацию молекул фуллеренов при поглощении фотонов.**

Обнаружено также, что при высоких интенсивностях возбуждения $I > 10^{11}\text{ Вт/см}^2$ происходит насыщение роста фотопотемнения [29-30] и замедление релаксации фотоиндуцированного отклика пленки C_{60} с ростом интенсивности накачки. Это обусловлено дополнительным разогревом носителей заряда из-за процессов внутренней конверсии электронов из высоковозбужденных зон.

- В широкой спектральной области 1.6-3.4 эВ изучен **фотоиндуцированный оптический отклик углеродных пленок карбонизованного полиакрилонитрила** и скорости его изменения [38]. Проведено сопоставление спектральных зависимостей оптического отклика и скоростей его изменения со структурой пленок.

- Совместно с лабораторией полупроводниковых структур **исследовано возбуждение и релаксация собственных мод в полупроводниковых микрополостях полупроводника ZnSe, граничащего с металлическими пленками Cr и Cu на кварцевых подложках [39,53]. Показано, что фотоиндуцированное изменение граничных условий с помощью фемтосекундных лазерных импульсов приводит к сдвигу частот собственных колебаний микрополости и их уширению. Обнаружено возбуждение когерентных фононов в микрополости.**

- Измерены времена релаксации когерентной поляризации в конденсированных средах методом фемтосекундной интерференционной спектроскопии. Метод может применяться при малой мощности возбуждения и свободен от экспериментальных трудностей, связанных с появлением паразитного сигнала вблизи нулевой задержки в методе возбуждение-зондирование. В эксперименте [42] 20 фс импульс с генератора разделялся на 2 идентичных коллинеарных импульса одинаковой интенсивности и поляризации с помощью интерферометра Майкельсона, которые направлялись на образец с регулируемой задержкой. При этом в образце индуцировались две когерентные волны поляризации, интерферирующие между собой, если время задержки сравнимо с T_2 . Полученная интерференционная картина регистрировалась чувствительным детектором. Возможности метода продемонстрированы на двух образцах допированных стекол с существенно различным неоднородным уширением полосы поглощения (500 нм и 40 нм). Измерения показали, что для широкополосного образца T_2 не превышает длительности импульса (20 фс), а для узкополосного $T_2 \sim 50\text{ фс}$.

Помимо метода “возбуждение-зондирование” использовались и **другие методы исследования.**

- Изучены процессы фотоиндуцированной полимеризации и фотоиндуцированной диффузии молекулярного кислорода в тонких пленках C_{60} при их облучении фемтосекундными лазерными импульсами. Сравнение КР спектров, поглощенной энергии и доз облучения, необходимых для наблюдения фотополимеризации, при использовании непрерывного излучения и фемтосекундных импульсов показало, что эффективность обоих фотоиндуцированных процессов существенно снижается в импульсном режиме [35]. Это приводит к различию фотопродуктов, возникающих в пленке в том и другом случае.

- Совместно с ЦКБ УП и ГОИ проводились эксперименты по исследованию особенностей объемных голограмм, создаваемых с помощью фемтосекундных лазерных импульсов [40,66-68]. Наблюдалось **ахроматическое восстановление волнового фронта** от такой голограммы. В этом случае механизм геометрооптического отражения доминирует над механизмом дифракции излучения на периодической интерференционной структуре, благодаря малому числу зарегистрированных периодов последней, обусловленному малой длительностью импульсов (рис.2).

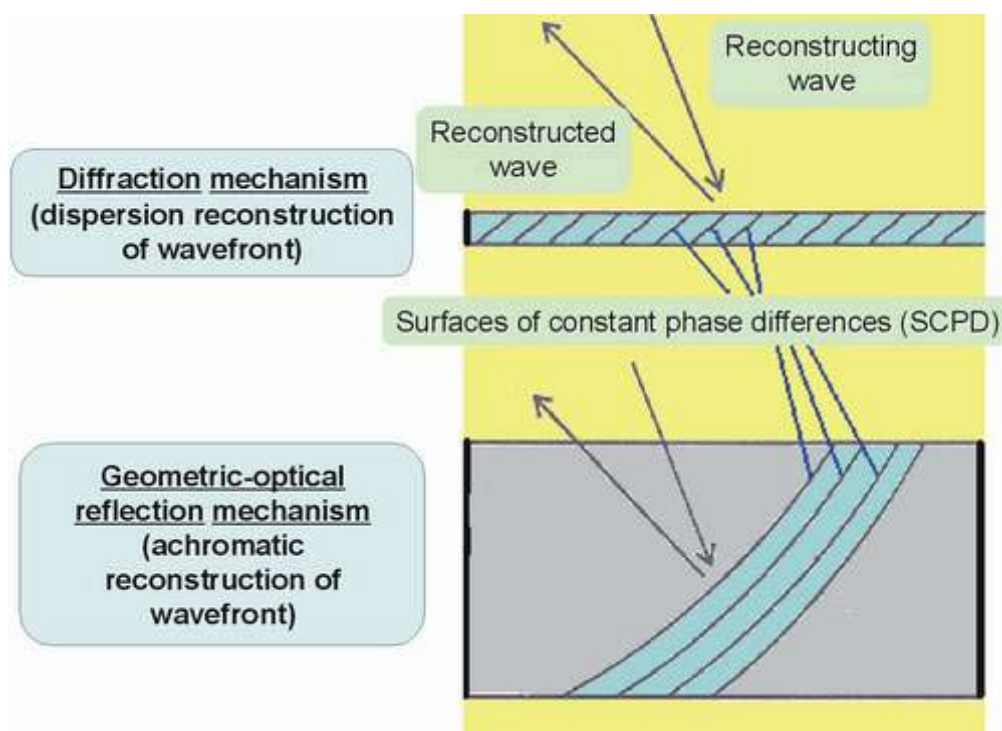


Рис. 2. Механизмы дифракционного и ахроматического восстановления волнового фронта.

В конце прошлого века в связи с проблемой в материальных и людских ресурсах, устаревшая техника не модернизировалась, и в течение некоторого времени эксперименты приходилось ставить в зарубежных лабораториях. Однако постепенно, благодаря финансовой поддержке РАН и других организаций, в Институте спектроскопии стала появляться самая современная фемтосекундная техника, которая была собрана в **единый спектрометрический комплекс в рамках Центра коллективного пользования (ЦКП) в начале 2004 года**. По мере появления различных единиц этой техники в институте возобновились

эксперименты, использующие новые лазеры третьего поколения. Процесс расширения экспериментальных возможностей комплекса непрерывно продолжается и в настоящее время.

Фемтосекундный лазерный комплекс ЦКП «Оптико-спектральные исследования» ИСАН размещается в специально оборудованном беспылевом зале со стабилизацией температуры с точностью до одного градуса. Все оборудование размещено на виброустойчивых оптических столах фирмы «Станда», расположенных на едином изолированном фундаменте, и покрыто защитными кожухами, внутри которых поддерживается небольшое избыточное давление во избежание проникновения пыли к оптическим элементам (Рис.3). Комплекс содержит собственно лазерную часть, системы измерения параметров импульсов, системы перестройки частоты, системы регистрации для проведения экспериментов типа возбуждение-зондирование, фотоэлектронный лазерный микроскоп и вспомогательные системы, обеспечивающие работу основных узлов

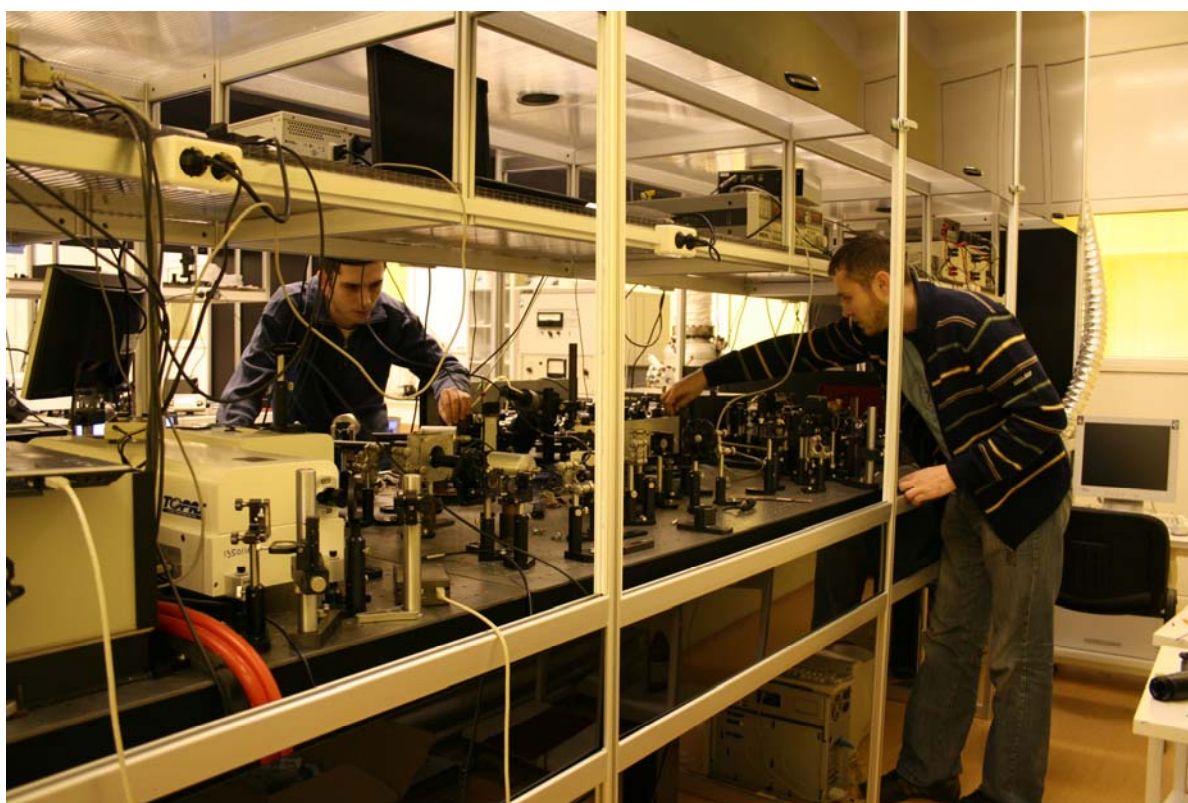


Рис. 3.

(блоки питания, блоки охлаждения, электронные управляющие блоки, ПК и проч.). Схема основных лазерных компонент комплекса и их выходные параметры приведены на рис.4. Лазерная часть состоит из генератора фемтосекундных импульсов Tsunami HP и регенеративного усилителя Spitfire HP фирмы Spectra Physics. Накачка генератора осуществляется на 532 нм непрерывным твердотельным Nd:YVO₄ лазером Millenia-V мощностью 4.5 Вт с диодной накачкой, усилитель накачивается импульсным твердотельным Nd:YLF лазером Evolution-X с диодной накачкой, средняя мощность на частоте повторения импульсов 1 кГц составляет 8 Вт на 527 нм.

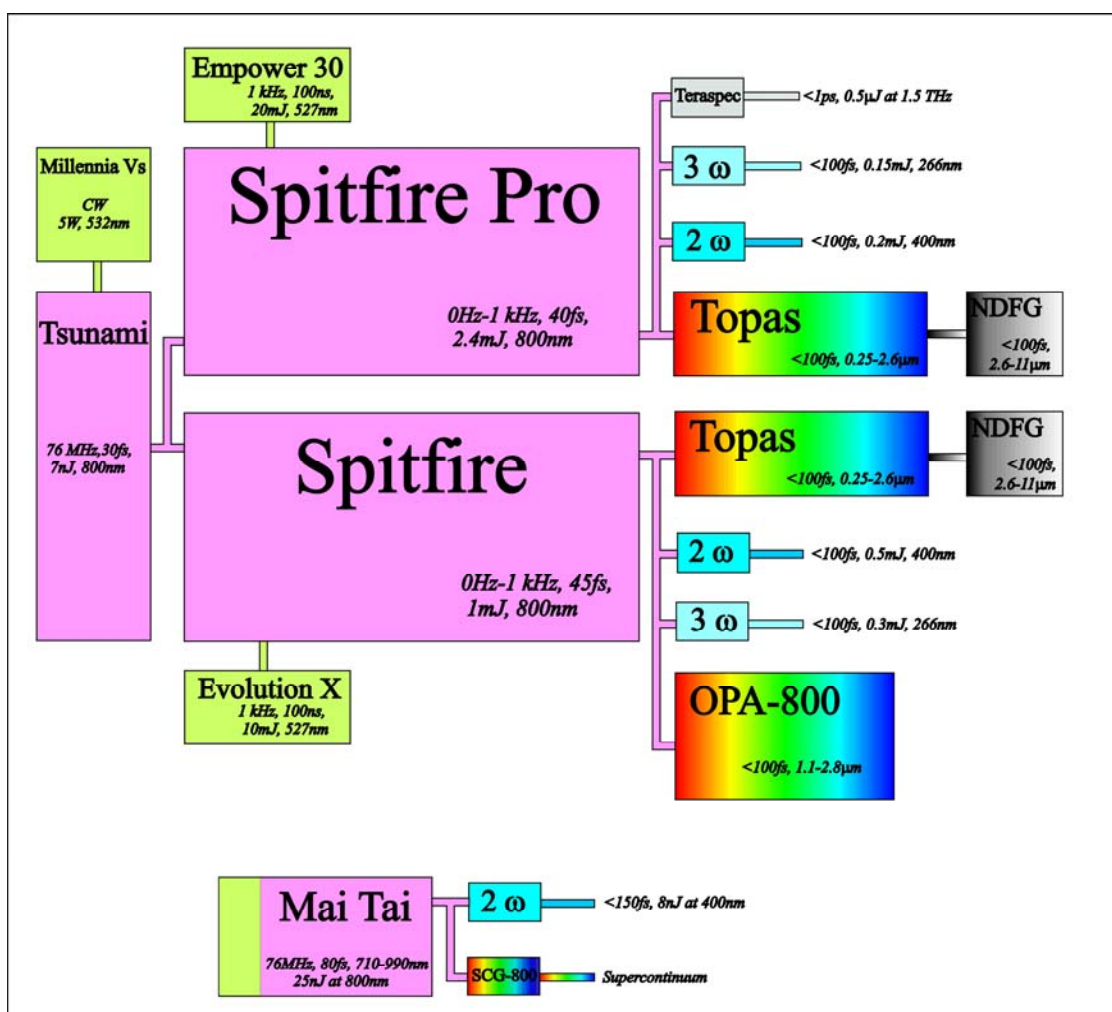


Рис. 4. Схема фемтосекундного лазерного спектрометра.

Следует отметить, что в лазерах третьего поколения используется усиление chirпированных импульсов, поэтому ограничения, накладывавшиеся самофокусировкой в усилительных каскадах, и связанные с этим процессом временные и пространственные искажения импульса отсутствуют. Энергия фемтосекундных импульсов на выходе усилителя может достигать 2.5 мДж на 800 нм при длительности импульса 30 фс и частоте повторения 1 кГц. Спектральная ширина импульсов на полувысоте (FWHM) составляет ~20 нм. Распределение энергии по сечению пучка близко к гауссову при дифракционной расходимости, разброс параметров от импульса к импульсу меньше процента. Последнее обстоятельство крайне важно для получения стабильных импульсов при нелинейных преобразованиях частоты и позволяет получить широкий диапазон перестройки. Воспроизводимость параметров от импульса к импульсу наиболее важно в экспериментах типа возбуждение-зондирование, в которых происходит усреднение данных по нескольким тысячам импульсов.

Хорошее качество пучка дает возможность легко получить интенсивность выше 10^{16} Вт/см² при фокусировке импульса на основной длине волны 800 нм. Для перестройки частоты имеются 3 системы параметрических усилителей. Две из них работают в ближнем ИК-диапазоне (от 1150 до 8000 нм), третья – универсальный параметрический усилитель «Топаз», работающий с непрерывной перестройкой в спектральной области от 240 нм до 10 мкм. Уже это сочетание параметров делает комплекс уникальным. Следует особо отметить, что по сравнению с предыдущей самодельной системой на красителе, помимо очень существенного увеличения спектрального диапазона, на 3 порядка выросла

«скорострельность» установки. Уникальная многоканальная система регистрации, разработанная российской фирмой «CDP Systems» (г. Троицк), дает возможность полностью реализовать этот выигрыш в экспериментах типа возбуждение-зондирование, наиболее широко используемых для исследования динамики ультрабыстрых процессов. Использование диодных линеек вместо CCD для широкополосной регистрации разностных спектров позволяет работать при частоте следования 1 кГц (CCD-линейки работают только до десятков Гц). Это приводит к уменьшению времени проведения эксперимента на 3 порядка по сравнению с предыдущей системой. К настоящему времени в лаборатории завершена отладка лазерной части (генератор, усилитель и преобразователи частоты фирмы Spectra Physics, рис. 4) и двух систем регистрации для проведения экспериментов типа «возбуждение-зондирование» – высокочувствительной одноканальной для работы с фиксированной длиной волны зондирования (ООО «Авеста-проект») и уникальной широкополосной многоканальной системы для работы на частоте 1 кГц (ООО «Клуб деловых партнеров»). Лазерный фемтосекундный спектрометр нового поколения, входящий в состав комплекса, позволяет получать импульсы излучения длительностью до 30 фс с энергией до 2,5 мДж и частотой следования 1 кГц с возможностью перестройки рабочей длины волны от 240 до 11000 нм и в терагерцовом диапазоне от 10^5 до 10^6 нм [46].

На вновь запущенной установке проводится работа по трем главным направлениям:

- 1. Исследование динамики фотоиндуцированных процессов в различных материалах;**
- 2. Дальнейшее развитие экспериментальных возможностей комплекса;**
- 3. Исследование нелинейных фотопревращений под действием мощного фемтосекундного излучения.**

По первому направлению:

Информация получается методом возбуждения и зондирования в виде набора разностных спектров (разность логарифмов нормированных сигналов с возбуждением и без возбуждения) пропускания и/или отражения образца, снятых с фемтосекундной экспозицией в различные моменты времени до и после возбуждения образца фемтосекундным импульсом. Исследована динамика фотоиндуцированных процессов и ее связь со структурой молекулярных комплексов. Очевидно, что пространственное распределение компонентов наноструктур, а также взаимная упаковка субъединиц в наноструктурированном материале играет определяющую роль в свойствах материала в целом. В свою очередь информацию об этом можно получить, исследуя релаксационные свойства вещества. Нанометровые размеры субъединиц предполагают, что самые короткие времена релаксации возбуждений лежат в фемтосекундном диапазоне. Поэтому фемтосекундная спектроскопия может явиться одним из наиболее адекватных методов исследования и сертификации наноструктурированных материалов. Кроме того, этот оптический метод является неразрушающим и позволяет сохранить в ходе исследования все функциональные свойства исследуемого материала.

Продемонстрированы возможности метода фемтосекундного возбуждения-зондирования для наноструктурированных материалов двух типов: ассоциатов периферических пигмент-белковых комплексов светособирающей антенны LH2 и LH3 фотосинтетического аппарата пурпурных бактерий и гетерофазных наноструктур фуллерен-металл.

- Гетерофазные наноструктуры C_{60}/Sn формировались в 50-150 нм пленках на тонких кварцевых подложках методом вакуумного напыления из двух отдельных источников для металла и фуллерена. Диагностика приготовленных таким способом образцов с помощью рентгеноструктурного анализа, электронной микроскопии, оптических и КР спектров показала, что, меняя режим напыления, можно получить пленки, состоящие из полимеров фуллерена, 10 нм нанокристаллитов олова, покрытых анионами фуллерена, ориентированных кристаллитов олова субмикронного размера (практически чисто металлические пленки) и аморфных структур, содержащих фракталы металла. Кинетические кривые, полученные для перечисленных структур (Рис. 5), демонстрируют чрезвычайно высокую чувствительность динамики сверхбыстрых фотоиндуцированных процессов в композитных средах к количественному соотношению и пространственной упаковке компонентов [48-51]. Ускорение релаксации полимерных образцов в ИК диапазоне по сравнению с чистым C_{60} связано с ростом эффективности рекомбинации носителей заряда в полимерах.

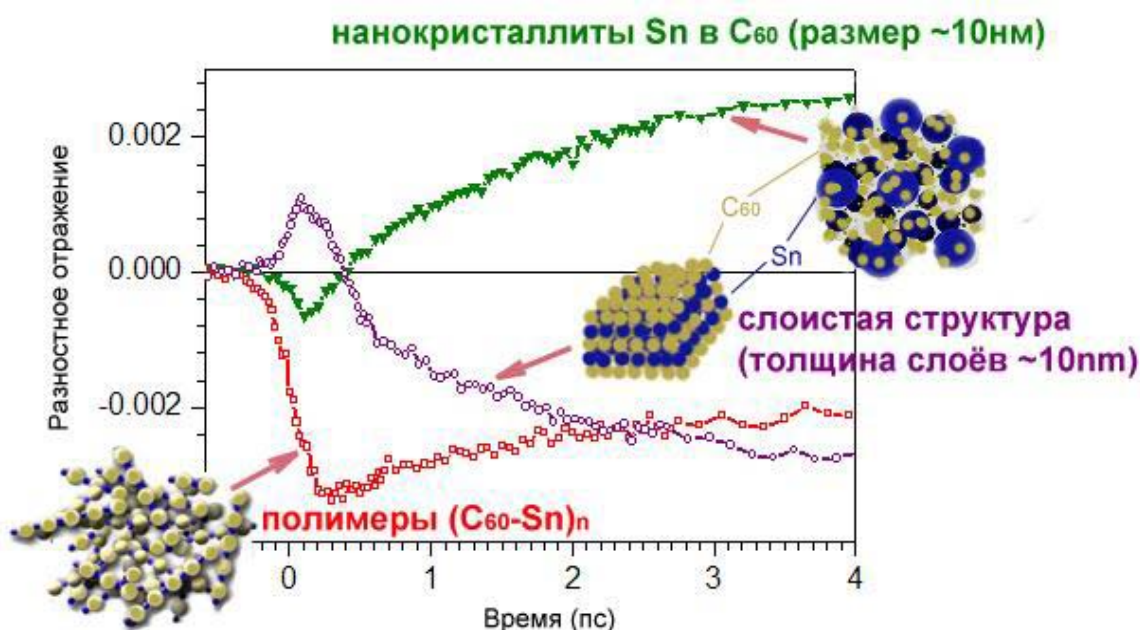


Рис. 5

Более сложная динамика в слоистых образцах связана с одновременным возникновением неравновесных электронов в металле и возбужденных нейтралов в слое фуллерена с последующим надбарьерным переносом первых на соседние молекулы и диффузией вторых к слою металла. В образцах с нанокристаллитами олова изначально присутствуют анионы C_{60}^- , покрывающие металл субмонослоем и дающие основной вклад в наблюдаемую релаксацию, которая связана с особенностями процессов переноса заряда от металла к фуллерену и обратно и переноса энергии между молекулами фуллерена. При увеличении размеров кристаллитов металла до микронных релаксация полностью соответствует наблюдаемой в чисто металлической пленке.

- Исследована **динамика разностных спектров поглощения** в области 800-900 нм **ассоциатов** сильно связанных светособирающих комплексов **LH2 и LH3** фотосинтезирующей пурпурной бактерии *Trs. Sibirica* **при возбуждении 40 фс импульсом на 800 нм**. Основные полосы поглощения исследованных комплексов с максимумами около 800, 830 и 850 нм обусловлены поглощением одинаковых

молекул бактериохлорофилла (БХл), образующих кольцевые структуры с характерным размером порядка десятков нм, отличающиеся главным образом количеством и взаимной ориентацией БХл. Оптические спектры, полученные методом Аленцева-Фока (рис. 6, левый рисунок), показывают, что ассоциат состоит из ~ 8 обычных для пурпурных бактерий комплексов LH2 и LH3 в соотношении 1:1. В экспериментах зарегистрирован **перенос энергии возбуждения внутри комплексов** (от B800 к B830 или B850) с постоянной времени $\tau \sim 500$ фс; **перенос энергии между комплексами** (от полосы B830 комплекса LH3 (B800-830) к полосе B850 комплекса LH2 (B800-850)) с $\tau \sim 2,5$ пс, **деактивация возбуждений** в полосе B850 комплекса LH2 с $\tau \sim 800$ пс. **Отрицательная величина поляризации сигнала P** на длинноволновом краю спектра фотоиндуцированных изменений оптического поглощения, наблюдающаяся только для данного типа бактерий, указывает на хаотичное слипание комплексов с параллельным или перпендикулярным направлением осей симметрии комплексов относительно друг друга в ассоциате (рис. 6, правый рисунок) [52].

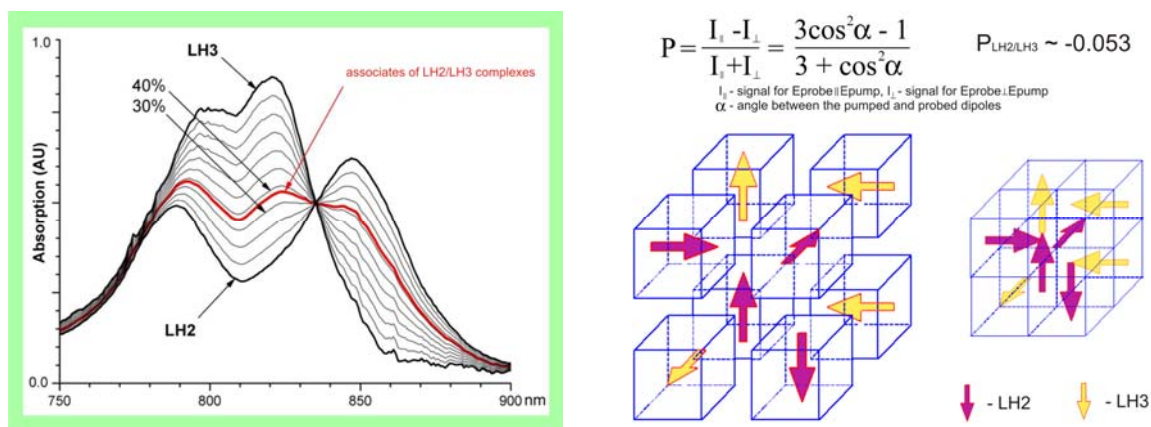


Рис. 6.

- Исследована **релаксация неравновесных носителей заряда в слоистых структурах «полупроводник-металл»** для образцов ZnSe на подложках из Cr при возбуждении фемтосекундными импульсами с энергией квантов больше и меньше ширины запрещенной зоны ZnSe. Моды полости полупроводниковой пленки на металле – очень чувствительный инструмент для детектирования сверхбыстрых фотоиндуцированных процессов на границе металл-полупроводник. Фемтосекундный лазерный импульс вызывает фотоиндуцированное изменение диэлектрической проницаемости полупроводника и, следовательно, оптической толщины полости из-за оптического возбуждения полупроводника и/или проникновения электронов в полупроводник через барьер Шоттки, приводящее к сверхбыстрому фотовольтаическому эффекту. Изменение диэлектрической проницаемости металла под действием фемтосекундного лазерного импульса, приводящее к мгновенному изменению граничных условий полости, может позволить наблюдение генерации фотонов в нестационарном резонаторе (динамического эффекта Казимира) и провести прямые измерения динамики нестационарного туннелирования электрона сквозь барьер (туннелирование волнового пакета).

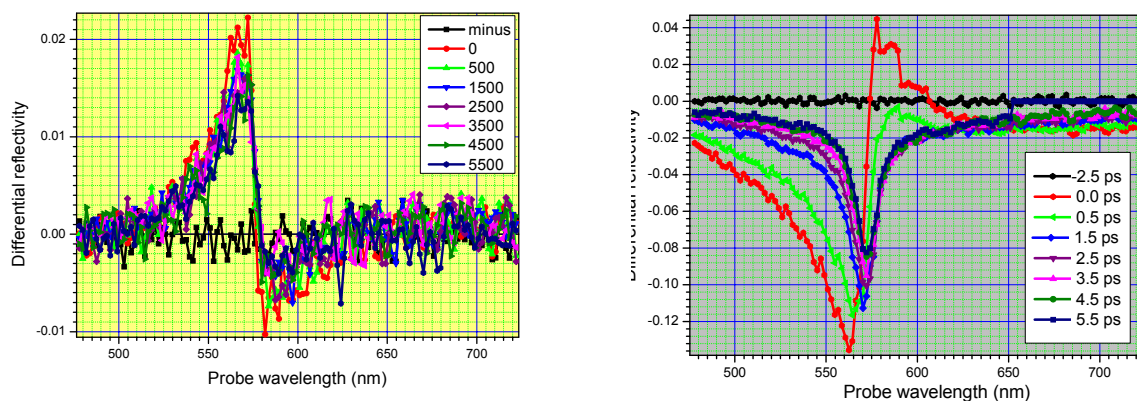


Рис. 7.

Обнаружен долгоживущий (>200 пс) **красный сдвиг** (рис. 7, слева) интерференционных мод микрополости «полупроводник-металл» при возбуждении на **800 нм**, связанный с изменением фазы отраженного излучения при нагреве подложки, и короткоживущий (< 150 фс) **синий сдвиг** (рис. 7, справа) при возбуждении на **400 нм**, связанный с изменением диэлектрической проницаемости полупроводника [53].

- Исследованы **спектральные изменения** (Рис. 8) в **растворах** (желтый фон) и **пленках** (серый фон) **проводящих полимеров** (интерполимерного комплекса полианилина и поли-2-акриламида-2-метил-1-пропан-сульфоновой кислоты) при возбуждении 40 фс импульсом на 800 или 400 нм. В обоих образцах наблюдалось выцветание полосы эмеральдина в широкой области 650-900 нм, поглощение возникающих свободных носителей заряда в ИК области (>850 нм) и катион-радикала на 450-470 нм с последующей их релаксацией. Особенности релаксации возбужденных носителей заряда обусловлены в основном донорно-акцепторными взаимодействиями предельно окисленных и предельно восстановленных участков полианилиновой цепи [54].

- Исследована **динамика разностных спектров отражения монокристаллов висмута и теллура** в диапазоне зондирования 500-900 нм при возбуждении 40 фс импульсом на 400 или 800 нм различной интенсивности. Во всех случаях во время разрешенного фотоиндуцированного отклика наряду с электронной релаксационной компонентой присутствуют когерентные осцилляции отражения, порождаемые полносимметричными A_1 фононами. Обнаружена **зависимость амплитуды когерентных осцилляций A_1 фононов в Те от знака и величины чирпа**, возбуждающего фемтосекундного лазерного импульса, а также различие осцилляций и релаксационного отклика для стоксовой и антистоксовой частот [55,56]. На рис. 9 приведена зависимость относительного разностного отражения $\frac{\Delta R}{R} = \frac{R(t) - R(t < 0)}{R(t < 0)}$ зондирующего импульса для

монокристалла Те от времени задержки между импульсами накачки и зондирования при изменении чирпа лазерного импульса α . На нижней панели показаны в большем масштабе осцилляции при малых временных задержках. Возбужденное состояние кристалла релаксирует к равновесному за времена порядка десятка пикосекунд и на эту релаксацию наложены быстрые осцилляции, порождаемые полносимметричным A_1 когерентным фононом.

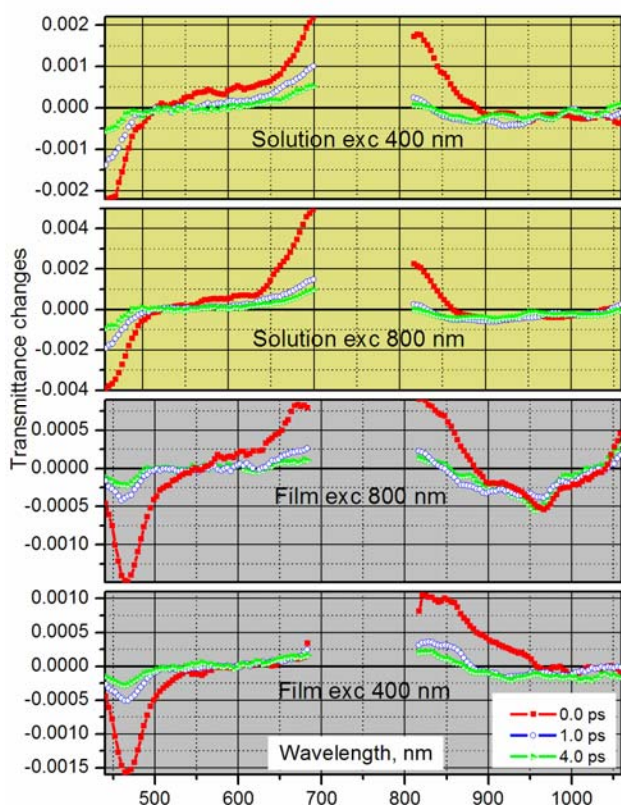


Рис. 8.

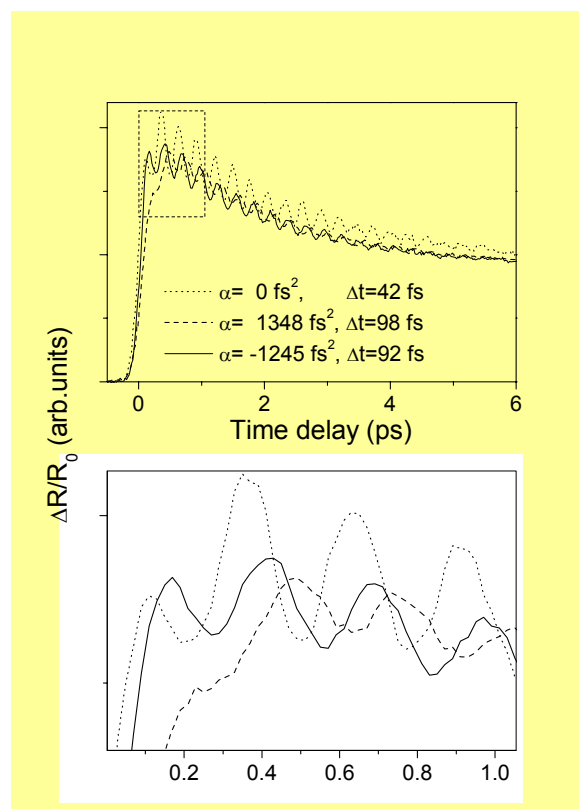


Рис. 9.

С увеличением чирпа амплитуда осцилляций уменьшается, причем скорость спада в два раза больше для положительного чирпа, чем для отрицательного. В обоих кристаллах обнаружена **зависимость** наблюдаемой в эксперименте **амплитуды осцилляций от длины волны зондирующих импульсов**.

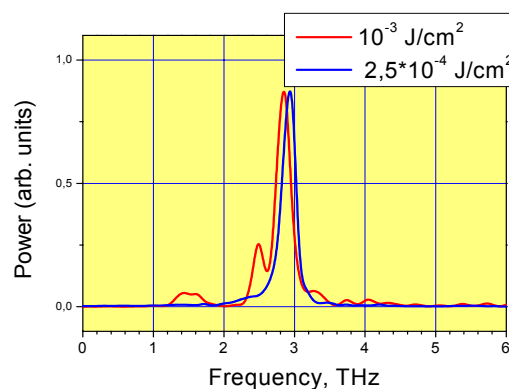
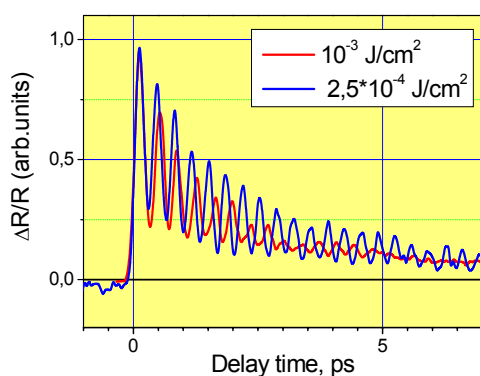


Рис.10.

На рис. 10 представлена наблюдавшаяся на 500 нм динамика разностного отражения, полученная для монокристалла Bi, возбуждаемого импульсами на 800 нм при разных интенсивностях накачки, а также соответствующие спектры наблюдаемых осцилляций. Виден **рост затухания осцилляций**, а также **уширение спектра** **полносимметричных A_1 когерентных фононов** в сторону низких энергий и **появление новых частот** с увеличением интенсивности возбуждения.

По второму направлению:

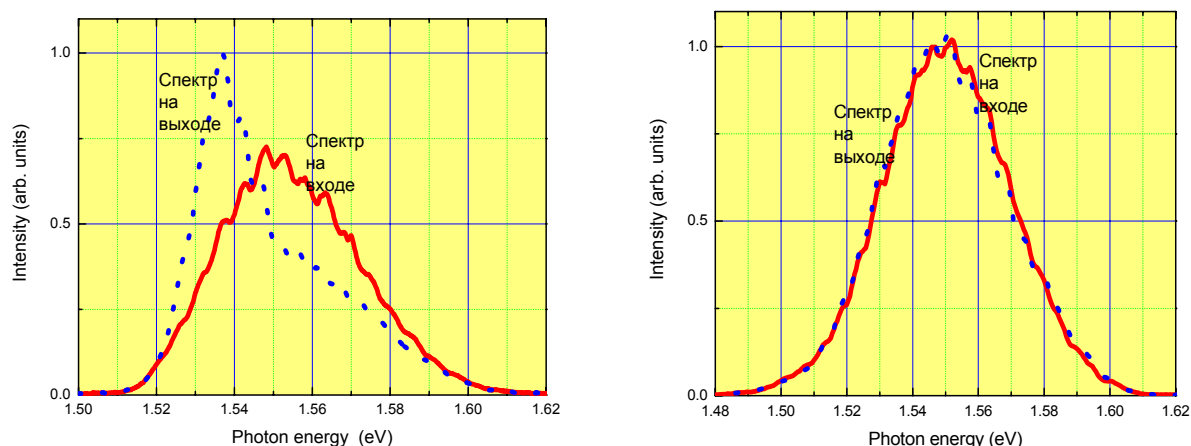


Рис. 11.

- Обнаружено **изменение спектра** (рис.11) фемтосекундного лазерного импульса с наклонным фронтом за счет генерации терагерцового излучения в LiNbO_3 (левый рисунок). При этом **получен рекордный ($\approx 140\%$) коэффициент конверсии 800-нм фотонов в кванты терагерцового излучения**. При использовании импульсов с нормальным фронтом эффективность преобразования резко падала, а спектр практически не изменялся при прохождении через тот же кристалл (правый рисунок). Это доказывает, что единственной причиной изменения спектра является преобразование в терагерцовое излучение, что позволяет определить абсолютную энергию и частоту терагерцовых импульсов [57,58]. При этом получено преобразование по энергии 0.75% при энергии исходного 40 фс импульса на 800 нм 50 мкДж. Коэффициент **преобразования ИК квантов в кванты терагерцового излучения равен не менее 140%** (в предположении частоты терагерцового импульса 2 ТГц, рис.12), что свидетельствует о включении механизма каскадного преобразования.

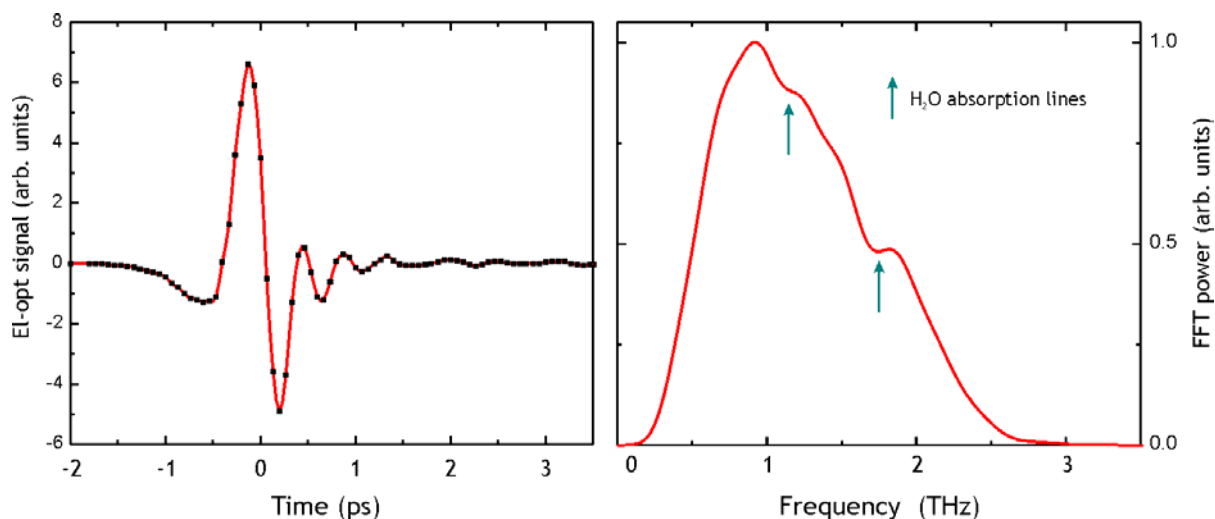


Рис.12. Измеренный временной профиль поля терагерцового импульса и его спектр.

- Проведен ряд экспериментов (совместно с лабораторией лазерной спектроскопии и Университетом г. Лозанна, Швейцария) с использованием фемтосекундного излучения для наблюдения изображений в фотоэлектронном микроскопе.

При облучении кремниевых наноострий второй гармоникой импульсного фемтосекундного лазера на титанате сапфира, **получено сверхвысокое пространственное разрешение двухфотонных фотоэлектронных изображений** (до 3 нм, что является наилучшим достигнутым к настоящему времени в фотоэлектронном микроскопе пространственным разрешением). Кроме того, **измерено абсолютное значение коэффициента двухфотонного внешнего фотоэффекта** [43].

Двухфотонный фотоэффект из материала острия, вызываемый проходящими через него короткими лазерными импульсами использовался для **невозмущающего измерения ближнего поля света**. Использовались заостренные оптические волокна, напыленные металлом (алюминий с небольшой примесью никеля) так, чтобы сформировать на конце волокна непокрытую металлом прозрачную для света апертуру диаметром 50–200 нм. Указанные образцы вставлялись в вакуумную камеру лазерного фотоэлектронного микроскопа [44,45] (Рис. 13). В эксперименте наблюдалась квадратичная зависимость фототока от мощности лазерного облучения, которая ясно демонстрирует двухфотонный характер внешнего фотоэффекта. На рисунке приведены полевые эмиссионные изображения острия волокна с лазером и без, а также зависимость квадратного корня интенсивности фототока от расстояния до центра апертуры ρ , то есть распределение $E^2(\rho)$. Такая зависимость представляет собой невозмущенное измерением распределение электрического поля света в субволновой апертуре.

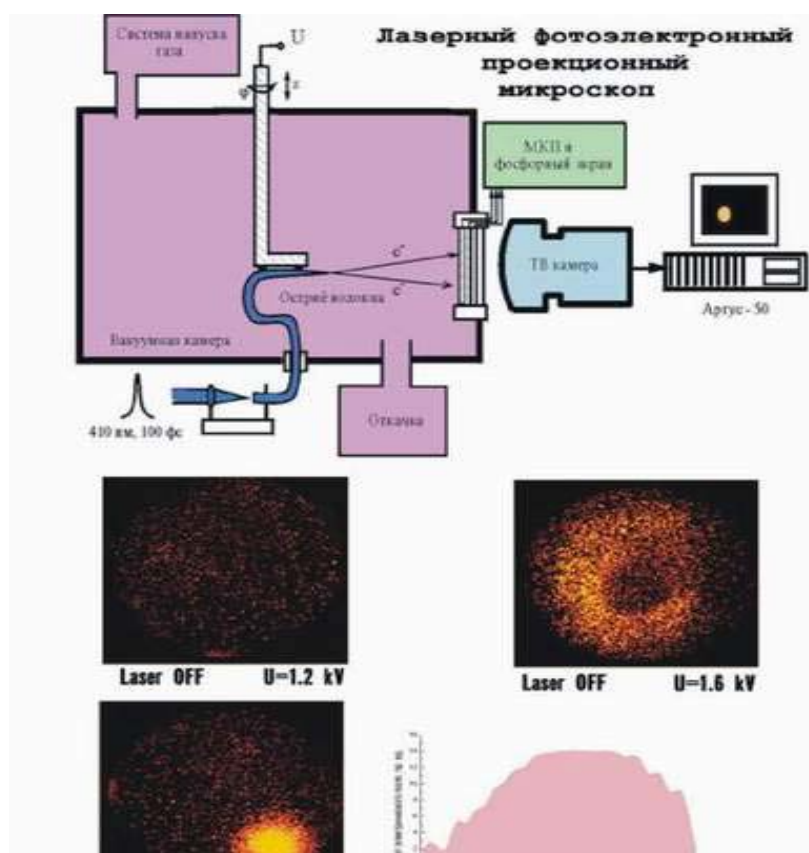


Рис. 13. Эксперимент по невозмущающему измерению ближнего поля света [44].

- Методом фемтосекундной лазерной проекционной микроскопии визуализированы органические наноконплексы на поверхности металлического острия. В эксперименте [59] в качестве острой иглы использован кварцевый 100-нм капилляр, на который был напылён слой никеля (Рис. 14). Фотоэлектронные изображения двух покрытых никелем капилляров с толщиной напылённого слоя 25 нм и 40 нм (рис. 15) наблюдались при облучении острия фемтосекундным 400-нм излучением. Внешнее статическое поле, создаваемое при приложении к острию отрицательного потенциала -300 В, уменьшало работу выхода и позволяло осуществить однофотонную электронную эмиссию с металлической поверхности квантом света с $\lambda = 400$ нм. При этом детектируемый фотоэлектронный сигнал зависел линейным образом от энергии лазерного излучения. На следующем этапе покрытый слоем никеля кварцевый

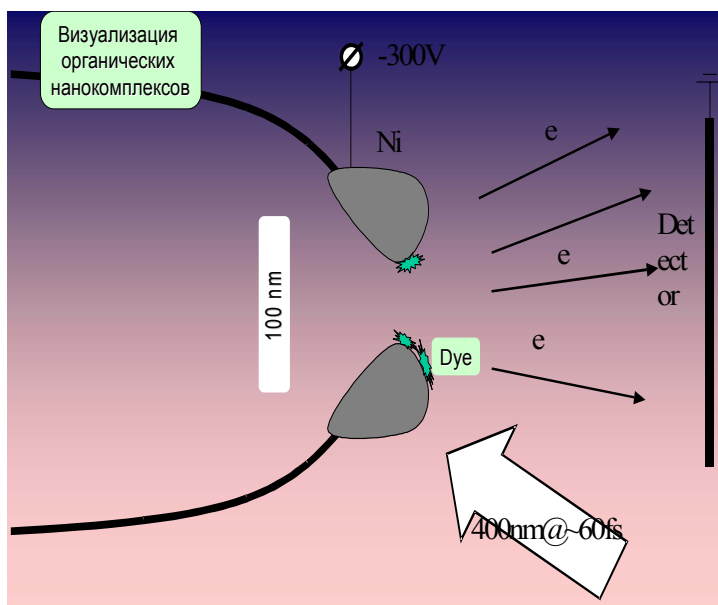


Рис. 14.

капилляр обмакивался в раствор молекул красителя С153 в этиловом спирте, а затем высушивался. При облучении этого образца фемтосекундным 400-нм-излучением наблюдалась квадратичная зависимость фотоэлектронного тока от энергии лазерного импульса и фотоэлектронное изображение органического наноконплекса на поверхности наноострия с пространственным разрешением на уровне 5 нм (Рис.15).

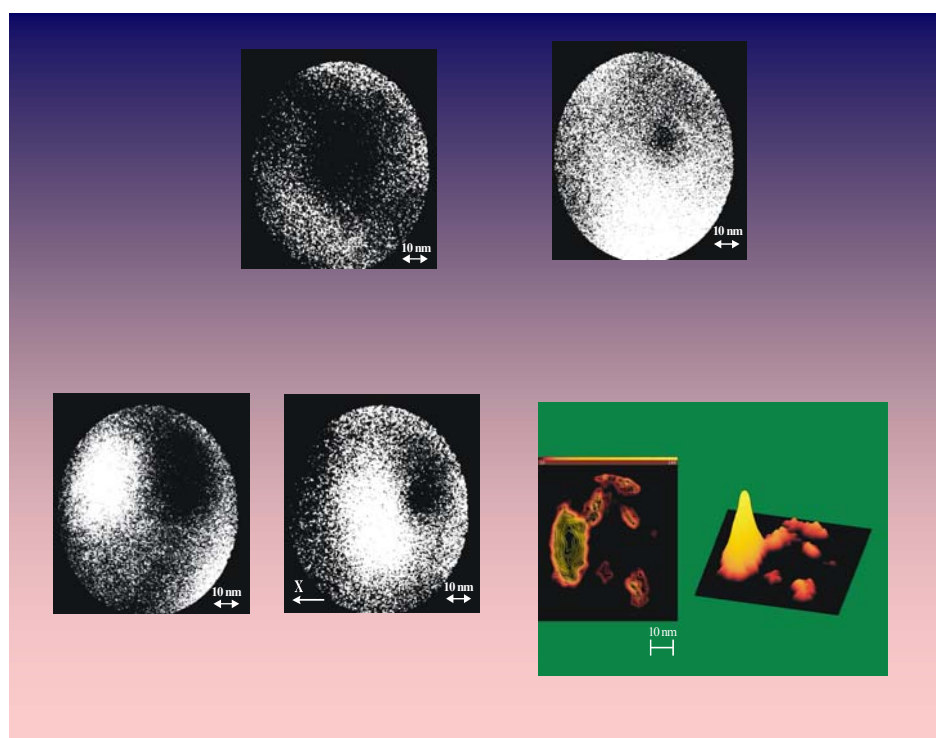
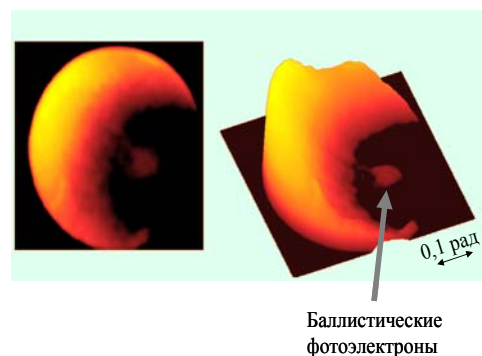
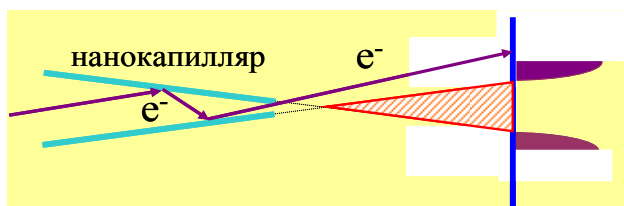


Рис. 15.

- При пропускании сквозь кварцевый нанокapилляр (апертура ≈ 70 нм) фотоэлектронов с острой вольфрамовой иглы (радиус острия ≈ 100 нм), облучаемой фемтосекундными лазерными импульсами ($\lambda \approx 400$ нм), **получен узконаправленный фотоэлектронный пучок для проведения экспериментов с фемтосекундным временным и нанометровым пространственным разрешением** [60-62].

Изображение пучка на экране фотоэлектронного лазерного микроскопа приведено на верхнем рисунке. Видно, что баллистическая компонента характеризуется малой угловой расходимостью. Нижний рисунок - изображение диэлектрической (кварцевой) наноапертуры, полученное с помощью распространяющихся внутри кварцевого нанокapилляра электронов.



Баллистические фотоэлектроны

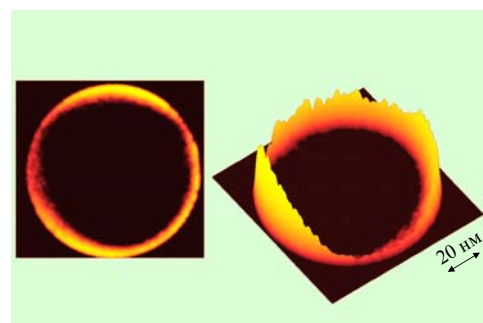


Рис. 16.

Такое измерение лежит за пределами возможностей стандартного электронного микроскопа.

- При облучении тонкой металлической мишени лазерными импульсами с $\lambda = 800$ нм и $\tau \approx 38$ фс **получен пучок фотоэлектронов, содержащий компоненту с длительностью менее 100 фс** (Рис. 17). Ультракороткая компонента фотоэлектронного пучка образована за счёт действия пондеромоторного потенциала и может быть выделена при приложении статического электрического поля [63,64].

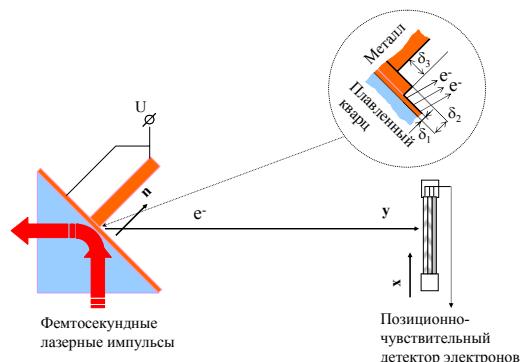
- **Направленный нанолокализованный ионный пучок** создан за счёт пропускания сквозь кварцевый нанокapилляр фотоионов, образованных при облучении вольфрамовой иглы фемтосекундным лазерным излучением. С помощью такого нанопучка получено изображение фрагмента диэлектрической наноапертуры [65].

По третьему направлению:

- При интерференции фемтосекундных импульсов в светочувствительных средах получены **ахроматические голограммы в планарных волноводах**. Создание таких структур позволяет сформировать двумерные голографические структуры, являющиеся одномерными зеркалами сложной кривизны, перспективные для создания нового класса ахроматических интегральнооптических элементов (совместно с Институтом УП РАН) [66-68].

Получение и диагностика пучка фотоэлектронов длительностью менее 100 фс

$$\delta_1 \sim 10 \text{ нм}, \delta_2 \approx 130 \text{ нм}, \delta_3 \approx 0.5 \text{ мм}$$



$$I_{\text{лаз}} \leq 2 \times 10^{12} \text{ Вт/см}^2, \text{ понд. потенциал} \leq 0.12 \text{ эВ}$$

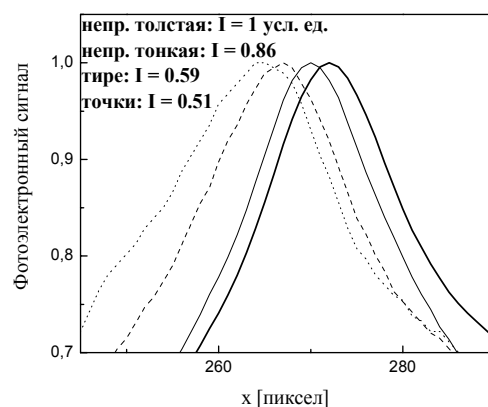


Рис. 17.

- Проведены эксперименты по созданию **фотоиндуцированных брегговских решеток в оптических волоконных световодах (ВС)** совместно с ИОФРАН. Брегговские решётки были получены с помощью фазовой маски и излучения третьей гармоники фемтосекундного лазера на Ti:сапфире [69].
- Исследована **коническая эмиссия суперконтинуума** при фокусировке фемтосекундного лазерного импульса с длиной волны 800 нм и длительностью 50 фс в объем стекла **линзой** и **аксиконом**. Экспериментально обнаружено, что с увеличением энергии импульса от 2 до 30 мкДж непрерывная картина конической эмиссии, снятая примерно за 1000 лазерных вспышек, распадается на спеклы при фокусировке линзой (Рис.18а) и расщепляется на узкие кольца при фокусировке аксиконом (Рис.18б). Спекл-структура говорит о «смазывании» интерференционной картины от многих филаментов в первом случае, а устойчивая кольцевая структура свидетельствует о существенно более высокой воспроизводимости позиционирования возникающих в стекле K108 микрофиламентов от импульса к импульсу во втором случае. Экспериментальные результаты качественно подтверждены численным моделированием [70,71].

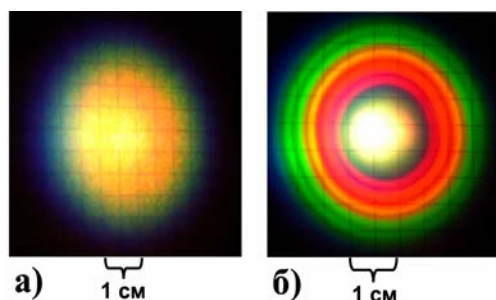


Рис. 18.

- Исследована фотодиссоциация молекул CF_2HCl в газовой фазе интенсивным фемтосекундным импульсом при перестройке фемтосекундного излучения в области обертоновых переходов моды ν_1 (1.3–1.8 мкм) [72,73], а также на длинах волн 0.4 и 0.8 мкм [74]. Проведенные эксперименты показали, что резонансы фемтосекундного излучения с колебательными обертоновыми переходами на длинах волн $\lambda_{0 \rightarrow 2}=1.69$ и $\lambda_{2 \rightarrow 4}=1.82$ мкм практически не влияют на процесс распада CF_2HCl . Обнаружено образование единственного конечного продукта диссоциации CF_3H , что существенно отличает диссоциацию CF_2HCl при облучении фемтосекундными импульсами от результатов термического пиролиза и диссоциации CF_2HCl под действием ИК или УФ лазерных наносекундных импульсов. Отсутствие влияния резонанса фемтосекундного излучения с колебательными обертоновыми переходами на процесс распада CF_2HCl может быть обусловлено низкой интенсивностью обертоновых переходов и большим ангармонизмом колебаний С–Н связей. По этим причинам сечение последовательных многофотонных переходов весьма мало, и интенсивность излучения должна быть достаточно высокой, чтобы обеспечить возбуждение и диссоциацию молекулы. При интенсивности $\sim 100 \text{ ТВт/см}^2$ основную роль в распаде молекул уже играет полевая ионизация, а вклад многофотонного возбуждения становится незаметным на фоне основного процесса. Начаты эксперименты по селективному возбуждению молекул на частотах фундаментальных колебаний основных связей [74].

В своих исследованиях лаборатория много и плодотворно сотрудничает как с другими лабораториями института (с лабораторией лазерной спектроскопии, д.ф.-м.н. В.И.Балыкин, с лабораторией нанофизики, к.ф.-м.н. Ю.Е.Лозовик, с лабораторией полупроводниковых структур, д.ф.-м.н. Е.А.Виноградов, с лабораторией колебательной спектроскопии конденсированных сред, д.ф.-м.н. Б.Н.Маврин, с лабораторией спектроскопии возбужденных состояний, д.ф.-м.н. Е.А.Рябов), так и с другими институтами в России (с Физическим институтом им. П.Н.Лебедева, с Институтом биохимической физики РАН, с Институтом общей физики РАН, с ЦКБ УП РАН, с ИФХБ им. А.Н.Белозерского МГУ, с ИФПБ РАН, с ИФТТ РАН, с ИФХ РАН, с кафедрой волновых процессов физфака МГУ) и за рубежом (с Лазерной лабораторией, г.Геттинген, Германия и Институтом биохимической физики, г. Геттинген, Германия, Лундским университетом, г. Лунд, Швеция, Университетом Брихама Янга, Прово, США, Университетом г. Лозанна, Швейцария).

За прошедшие годы в лаборатории подготовлены и защищены три докторские и восемь кандидатских диссертаций.

По результатам выполненных исследований опубликована одна монография.

Монография

1. В.С.Летохов, Ю. А. Матвеец, А. В. Шарков и др. Лазерная пикосекундная спектроскопия и фотохимия биомолекул. М.: Наука, 1987. - 252 с. b) *Laser Picosecond spectroscopy and Photochemistry of Biomolecules*. Ed. V.S.Letokhov (Adam Higler, Bristol, 1987, p.309).

Литература

1. Zherikhin A.N., Kriukov P.G., Matveets Yu.A., Chekalin S.V. About the origin of time structure of ultrashort laser pulses. *Kvantovaya Elektronika*, 1974, **1**, 956-959 (in Russian).

2. Zherikhin A.N., Matveets Yu.A., Chekalin S.V. Brightness limiting due to self-focusing at the amplification of ultrashort laser pulse in Nd glass and YAG. *Kvantovaya Elektronika*, 1976, **3**, N7, 1585-1590 (in Russian).
3. S.V.Chekalin, Yu.A. Matveets, A.P.Yartsev. Study of fast photoprocesses in biomolecules with the aid of femtosecond laser spectrometer. *Rev.Phys.Appl.*, 22, 1761 (1987).
4. Matveets Yu.A., Chekalin S.V., Yartsev A.P. Femtosecond energy transfer in physical stages of photosynthesis. *Pis'ma Zh. Eksp. Teor. Fiz.* 1986, **43**, N11, 546-548 (in Russian).
5. Chekalin S.V., Matveetz Yu.A., Shkuropatov A.Ya., Shuvalov V.A., Yartsev A.P. Femtosecond spectroscopy of primary charge separation in modified reaction centers *Rhodospseudomonas Sphaeroides* (R26). *FEBS Lett.*, 1987, **216**, N2, p.245
6. Chekalin S.V., Yartsev A.P. Differential spectra of the gematoporphirin in visible region at the condition of excitation by powerful subpicosecond pulse. *Biofizika*, 1988, **XXXIII**, N5. p.751-754 (in Russian).
7. Chekalin S.V., Sharkov A.V., Pakulev A.V., Matveetz Yu.A. Primary events in bacteriorhodopsin probed by subpicosecond spectroscopy. *Biochimica et biophysica acta*, 1985, **808**, p.94-102.
8. Chekalin S.V., Brekhov O.M., Rootskoy V.Yu., Sharkov A.V., Matveets Yu.A., Konyaschenko A.V. Fluorescence of bacteriorhodopsin under subpicosecond light excitation. *Photochemistry and Photobiology*, 1983, **38**, N1, p.109-111.
9. Aglitsky E.V., Zherikhin A.N., Kriukov P.G., Chekalin S.V. Peculiarities of X-ray spectra of plasma, created by subpicosecond laser pulses. *Zh. Eksp. Teor. Fiz.*, 1977, **73**, N10, 1344-1351 (in Russian).
10. Zherikhin A.N., Koshelev K.N., Kriukov P.G., Letokhov V.S., Chekalin S.V. Observation of anomalous intensity in the region 58-78 Å over transition C1 V11 during two step heating of plasma by ultrashort laser pulses. *Pis'ma Zh. Eksp. Teor. Fiz.*, 1977, **25**, N7, 325-328 (in Russian).
11. Zherikhin A.N., Koshelev K.N., Kriukov P.G., Letokhov V.S., Chekalin S.V. Search of amplification on far VUV transitions of multicharged ions in laser plasma column. *Kvantovaya Elektronika*, 1981, **8**, N1, p.88-97 (in Russian).
12. Letokhov V.S., Movshev V.G., Chekalin S.V. Ultrashort laser pulse photodetachment of Rhodamin 6G ions from the surface. *Zh. Eksp. Teor. Fiz.*, 1981, **81**, p.480-485 (in Russian).
13. Chekalin S.V., Letokhov V.S., Likhachev V.S., Movshev V.G. Laser photoion projector. *Appl.Phys.B*, 1984, **B33**, p.57-61.
14. Chekalin S.V., Golovlev V.V., Kozlov A.A., Matveets Yu.A. Yartsev A.P., Letokhov V.S. Femtosecond Laser Photoionization Mass Spectrometry of Tryptophan-Containing Proteins. *Journ. Phys. Chem.*, 1988, **92**, N 24, p.6855-6858.
15. Kozlov A.A., Chekalin S.V., Matveets Yu.A., Yartsev A.P., Letokhov V.S. Desorption of Ions Created at the Surface of Molecular Crystals by means of Femtosecond Laser Pulse. *Pis'ma v Zhurnal Eksperimentalnoi i Teoreticheskoi Fiziki*, 1988, **47**, N 6, p.294-296 (in Russian).
16. а) П.Г.Крюков, В.С. Летохов, Ю.А. Матвеец, Д.Н. Никогосян, А.В. Шарков. Селективное двухступенчатое возбуждение электронного состояния органических молекул в водном растворе пикосекундными импульсами света. *Квантовая электроника*. 5, 2490 (1978). б) P.G.Kryukov, V.S. Letokhov, D.N. Nikigosyan et al. Multiquantum photoreactions of nucleic acid components in aqueous solution by powerful ultrashort picosecond radiation. *Chem.Phys.Lett.* 61, 375 (1979).
17. E.V. Khoroshilova, N.P. Kuz'mina, V.S. Letokhov, Yu.A. Matveets. Nonlinear photochemical synthesis of biomolecules by powerful UV picosecond pulses. In:

Photochemistry and photobiology, ed. by A.H. Zewail. (Harwood Acad. Publ., 1983), vol. 2, p. 1267.

18. Ю.Е.Лозовик, Ю. А. Матвеец, А. Г. Степанов, В. М. Фарзтдинов, С. В. Чекалин, А.П.Ярцев. Femtosecond relaxation of excited carriers in $\text{CdSe}_x\text{S}_{1-x}$ microcrystallites in glass matrix under high excitation intensities. Письма в ЖЭТФ, 1990, 52, 851-854.

19. I.V.Bezel, Yu.A.Matveets, A.G.Stepanov, S.V.Chekalin, A.P.Yartsev. Two-photon absorption of powerful femtosecond pulse in semiconductor doped glasses at the energies higher than the band gap. Pis'ma v ZhETP, **59(6)** (1994) 376-380.

20. В.В.Головлев, Ю.А.Матвеец, А.М.Санов, В.С.Летохов. Исследование релаксации электронной температуры медной пленки при возбуждении фемтосекундными лазерными импульсами. Письма в ЖЭТФ, 55, N8, 441- 444, 1992.

21. Lozovik Y.E., Kovalenko S.A., Dobryakov A.L., Farztdinov V.M., Matveets Y.A., Merkulova S.P., Ernsting N.P. Fermi liquid study on femtosecond scale. - Laser Phys., 1999, v.9, No.2, p.557-563.

22. A.L.Dobryakov, S.A.Kovalenko, Yu.E.Loikov, S.P.Merkulova, V.M.Farztdinov, N.P.Ernsting. Femtosecond spectroscopy of relaxation processes in metals and high temperature superconductors. Soviet. Phys.: Zhurnal Eksperim. i Teoreticheskoi Fiziki 119, 1-12 (2001).

23. S.V.Chekalin, V.M. Farztdinov, V.V. Golovlev, V.S. Letokhov, Yu.E. Loikov, Yu.A. Matveetz, A.G. Stepanov. Femtosecond spectroscopy of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$: electron-phonon interaction measurement and energy gap observation. Phys. Rev. Lett. 67, N27, 3860-3863, 1991.

24. A.L.Dobryakov, V.M. Farztdinov, Yu.E. Loikov. Energy Gap in the Optical Spectrum of Superconductors. Physical Review, 1993, B47, N 17, 11515-11517.

25. A.L.Dobryakov, V.V. Golovlev, V.S. Letokhov, Yu.E. Loikov, Yu.A. Matveetz, A.G. Stepanov, V.M. Farztdinov, S.V. Chekalin. Femtosecond spectroscopy of superconductors $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$: the measurement of electron-phonon interaction parameter and energy gap observation. Soviet Phys.: Optika i Spectroscopia, 1994, 76, N 6, 975-983.

26. И.И.Венгрус, А.Л. Добряков, С.А. Коваленко, В.С. Летохов, Ю.Е. Лозовик, Г. Маровский, Ю.А. Матвеец, В.М. Фарзтдинов, Н.Р. Эрнстинг. Спектральная зависимость релаксации в $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ при фемтосекундном лазерном возбуждении. Письма в ЖЭТФ, том 66, вып.9, стр.739-743 (1995).

27. Чекалин С.В., Фарзтдинов В.М. Акессон Е., Сундстрем В. Релаксация C_{60} в растворах и пленках: результаты фемтосекундных исследований. Письма в ЖЭТФ, 1993, 58(4), 286-290.

28. V.M.Farztdinov, Yu.E. Loikov, Yu.A. Matveets, A.G. Stepanov, and V.S. Letokhov. Femtosecond Dynamics of Photoinduced Darkening in C_{60} Films. J. Phys. Chem., 1994, 98, N13 3290-3294.

29. I.V.Bezel, S.V.Chekalin, Yu.A. Matveetz, A.G. Stepanov, A.P. Yartsev, and V.S. Letokhov, Two-photon absorption of powerful femtosecond pulse in C_{60} Film. Chem. Phys. Lett. 1994, 218 N5, 6 475-478.

30. А.Л.Добряков, С.А. Коваленко, В.С. Летохов, Ю.Е. Лозовик, Г. Маровский, Ю.А. Матвеец, В.М. Фарзтдинов, Н.Р. Эрнстинг. Когерентные фононы в фуллеритах при фемтосекундном лазерном возбуждении. Письма в ЖЭТФ, том 61, вып.12, стр.957-961 (1995).

31. Chekalin S.V. Femtosecond spectroscopy of intra- and intermolecular relaxation in photoexcited fullerenes and fullerites. Femtochemistry. Ultrafast Chemical and Physical Processes in Molecular Systems, ed. M.Chergui, 1995, 649-653.

32. V.M.Farztdinov, A.L. Dobryakov, N.P.Ernsting, S.A.Kovalenko, V.S. Letokhov, Yu.E. Lozovik, Yu.A. Matveets. Spectral Dependence of Femtosecond Relaxation and Coherent Phonons Excitation in C₆₀ Films. *Phys. Rev. B* **56**(7), 4176-4185, 1997.
33. Chekalin S.V. Phototransformation in visible and near-IR femtosecond pump-probe studies of C-60 films - Comment. - *Appl.Phys.Lett.*, 1997, v.71, No.9, p.1276-1276.
34. Буше Д., Коваленко С.А., Масселин П., Матвеец Ю.А., Новиков М.Г., Рагульский В.В., Степанов А.Г., Чекалин С.В. Исследование ультрабыстрой релаксации фотовозбужденных фуллеренов при различных условиях возбуждения методом широкополосной фемтосекундной лазерной спектроскопии. - *Изв.АН сер. физическая*, 1998, v.62, No.2, p.237-244.
35. Компанец В.О., Мельник Н.Н., Хесс Б., Чекалин С.В. Фотоиндуцированные превращения в пленках C₆₀, облучаемых фемтосекундными лазерными импульсами. - *Письма в ЖЭТФ*, 1998, v.68, No.4, p.320-325.
36. С.В.Чекалин, А.П.Ярцев, В.Сундстрем. Фемтосекундная спектроскопия генерации носителей заряда в пленках C₆₀ 100 фс лазерными импульсами. *ЖЭТФ*, 2001, т.120, №4(10), с.810-822.
37. Н.И.Афанасьева, Ю.Е.Лозовик, Ю.А.Матвеец, А.Г.Степанов, С.В.Чекалин, А.Н.Щеголихин. Фемтосекундная спектроскопия монокристаллов полидиацетилена. *Оптика и Спектроскопия*, **85**(2), 808 – 812, 1997.
38. Т.С.Журавлева, Л.М.Земцов, Г.П.Карпачева, С.А.Коваленко, В.В.Козлов, Ю.Е.Лозовик, Ю.А.Матвеец, П.Ю.Сизов, В.М.Фарзтдинов. Фемтосекундная спектроскопия углеродных пленок. *Физическая Химия*, 1998, **17**, N6.
39. Vinogradov E.A., Dobryakov A.L., Kovalenko S.A., Lozovik Y.E., Matveets Y.A., Farztdinov V.M. Spectroscopy of polaritons in a semiconductor cavity. - *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*, 1999, v.169, No.3, p.347-348.
40. Dementiev D.A., Ivanov A.L., Serov O.B., Smolovich A.M., Stepanov A.G., Chekalin S.V. Achromatic reconstruction of femtosecond laser pulse wavefront. *JETP Lett.*, 1997, **65**
41. Lozovik Y.E., Lisin D.V., Ivanov A.I., Kompanets V.O., Matveets Y.A., Chekalin S.V., Merkulova S.P. Femtosecond laser pulse nanolithography using on STM tip. - *Laser Phys.*, 1999, v.9, No.2, p.564-569.
42. В.О.Компанец, Ю.А.Матвеец, С.В.Чекалин. Измерение времен релаксации когерентной поляризации в конденсированных средах методом фемтосекундной интерференционной спектроскопии. – *Квантовая электроника*, 2001, т. 31, №5, с. 393-394.
43. Секацкий С.К., Чекалин С.В., Иванов А.Л., Компанец В.О., Матвеец Ю.А., Степанов А.Г., Летохов В.С. Проекционная фотоэлектронная микроскопия сверхвысокого пространственного разрешения с использованием фемтосекундных лазеров. - *ЖЭТФ*, 1999, v.115, No.5, p.1680-1688.
44. S. K. Sekatskii B. N. Mironov, V. O. Kompanets, Yu. A. Matveets, S. V. Chekalin, G. Dietler and V. S. Letokhov Nonperturbing Observation of Optical Near Field . - *Appl.Phys.Lett.* v.83, p.4900 (2003).
45. Невозмущающая визуализация света в ближнем поле с помощью фемтосекундных импульсов, С.К.Секацкий, Б.Н.Миронов, В.О.Компанец, Ю.А.Матвеец, Г.Дитлер, С.В.Чекалин, В.С.Летохов, *Известия Ан. сер. Физическая*, т.68, с. 134, 2004.
46. Уникальный фемтосекундный спектрометрический комплекс, как инструмент для ультрабыстрой спектроскопии, фемтохимии и нанооптики. С.В. Чекалин, *УФН*, т.176 №6, с.657-664, 2006.
47. Femtosecond pump-probe investigation of primary stages of charge carriers generation in C₆₀ films, Sergey V. Chekalin, Arkady P. Yartsev, Villy Sundstrom,

- Recent Advances in Ultrafast Spectroscopy, ed. by S.Califano, P.Foggi, R.Righini, Firenze, 2003.
48. S.V.Chekalin, V.O.Kompanets, M.S.Kurdoglyan, A.N.Oraevsky, N.F.Starodubtsev, V.Sundstrom, A.P.Yartsev Femtosecond pump-probe investigation of primary photoinduced processes in C₆₀/Sn nanostructures.- Synthetic Metals v.139 p. 799 (2003).
 49. Фемтосекундная спектроскопия первичных стадий релаксации фотовозбужденных квантоворазмерных структур фуллерен-олово, С.В.Чекалин, В.О.Компанец, Н.Ф.Стародубцев, А.П.Ярцев, В.Сундстрем, Известия Ан. сер. Физическая, т.68, с. 123, 2004.
 50. Femtosecond pump-probe investigation of primary photoinduced processes in C₆₀/Sn nanostructures, S.V. Chekalin, V.O. Kompanets, N.F. Starodubtsev, V. Sundstrom, and A.P. Yartsev, Femtochemistry and Femtobiology, Ultrafast Events in Molecular Science, p. 553-556, Ed. M.Martin, J.T.Hynes, Elsevier (2004).
 51. Сверхбыстрые процессы фотоиндуцированного переноса заряда и энергии в наноструктурированных пленках фуллерен-металл С.В.Чекалин, ЖЭТФ, т.130 №5, с.873-886, 2006.
 52. Динамика возбуждений в прочно связанных ассоциатах комплексов В800-850 и В800-830 из фотосинтезирующей пурпурной бактерии *Thiorhodospira sibirica*. А.П. Разживин, И.А. Степаненко, В.С. Козловский, В.О. Компанец, С.В. Чекалин, З.К. Махнева, А.А. Москаленко, А.В. Тихонов, В.О. Попов***, Т.В. Тихонова, Биологические мембраны т.24 №6, стр. 466-473, 2007.
 53. Эксперименты по сверхбыстрой спектроскопии оптических мод микрополости на уникальном фемтосекундном спектрометрическом комплексе ИСАН. Е.А. Виноградов, В.О. Компанец, Ю.Е. Лозовик, Ю.А. Матвеев, С.В. Чекалин, Известия РАН ,сер. Физическая т.72, №5, с.717-720 (2008).
 54. Исследование сверхбыстрой релаксации в пленках полианилина методом фемтосекундного возбуждения-зондирования. Мельников А.А., Чекалин С.В., Компанец В.О., Иванов В.Ф., Грибкова О.Л., А.А.Некрасов, Электронный журнал - сборник статей конференции «Структура и динамика молекулярных систем», 2007 г., Выпуск №1, Казань, 2007, стр. 194
 55. Влияние фазовой модуляции лазерного импульса на генерацию когерентного полносимметричного фонона в монокристалле теллура, О.В. Мисочко, С.В.Андреев, В.О.Компанец, Ю.А.Матвеев, , А.Г.Степанов, С.В.Чекалин, Т.Dekorsy, ФТТ т.49 вып.11, с. 2070-2075, 2007.
 56. Effect of intense chirped pulses on the coherent phonon generation in Te O.V.Misochko, T. Dekorsy, S.V. Andreev, V.O.Kompanets, Yu.A.Matveets, A.G. Stepanov, and S.V. Chekalin, Appl.Phys.Lett. **90**, 071901 (2007).
 57. Модификация спектра фемтосекундного лазерного импульса при высокоэффективной генерации терагерцового излучения методом оптического выпрямления. А. Г. Степанов, А. А. Мельников, В. О. Компанец, С. В. Чекалин, Письма в ЖЭТФ т.85(5), с.279-282, 2007.
 58. Spectral modifications of femtosecond laser pulses induced by high-efficiency optical rectification. A.G.Stepanov, V.O.Kompanets, S.V.Chekalin, Proc. SPIE, v.6729, p. 672909, 2007.
 59. Фотоэлектронная фемтосекундная лазерная проекционная микроскопия органических наноконплексов Асеев С.А., Миронов Б.Н., Чекалин С.В., Летохов В.С., Письма в ЖЭТФ, т. 80, в. 8, стр. 645-649, 2004.
 60. Femtosecond Laser Photoemission Microscopy of Capillary Nanotips at Ultrahigh Spatial Resolution B.N. Mironov, S.A. Aseev, S.V. Chekalin, V.S. Letokhov, JETP, v. **101**, N.4, pp. 628-634, 2005. (ЖЭТФ **128**, №4, стр. 732-739, 2005).

61. Генерация нанофокализированного, узконаправленного пучка фотоэлектронов с помощью фемтосекундных лазерных импульсов. Б.Н.Миронов, С.А.Асеев, С.В.Чекалин, В.С.Летохов, Письма в ЖЭТФ т.83, вып.9, с.435-438, 2006.
62. Femtosecond laser source of nanolocalized directed photoelectrons S.A. Aseyev, B.N. Mironov, S.V. Chekalin, V.S. Letokhov, Appl.Phys.Lett. .v.89 p.112513, 2006.
63. Deflection of sub-100 fs electrons by femtosecond light. S.A.Aseyev, B.N.Mironov, S.V.Chekalin, Proc.SPIE, v.6735, p.673511, 2007.
64. Формирование электронного пучка длительностью менее 100 фс, образованного фотоэмиссией электронов фемтосекундными лазерными импульсами Б.Н.Миронов, С.А.Асеев, В.Г.Миногоин, С.В.Чекалин, ЖЭТФ т.133(6), с. 1155-1161 (2008).
65. Формирование нанофокализированных фотоионных пакетов вольфрама с помощью фемтосекундных лазерных импульсов. С.А. Асеев, Б.Н. Миронов, С.В. Чекалин, В.С. Летохов, Письма в ЖЭТФ, т.87(7), с.422-425 (2008).
66. Diffraction properties of femtosecond holograms. M.A.Servantes, A.M.Smolovich, V.S.Terpugov, D.A. Dement'ev, S.V. Chekalin, V.O. Kompanets, YU.A. Matveets, O.B. Serov, Proc. SPIE Vol 5402, p. 1-8, International Workshop on Quantum Optics 2003; Vitaly V. Samartsev; Ed. (2004).
67. Femtosecond holography in planar optical waveguides S.A. Aseyev, M. A. Cervantes, S.V. Chekalin, V.O. Kompanets, Yu.A. Matveets, O.B. Serov, A.M. Smolovich, V.S. Terpugov, Proc. SPIE v.6181 "Photon Echo and Coherent Spectroscopy 2005", ed.V.Samartsev, pp.274-281.
68. Geometric-optical reconstruction of femtosecond hologram in planar optical waveguide. E.Alvarez, M.A.Servantes, V.S.Terpugov, S.A.Aseyev, S.V.Chekalin, O.B.Serov, A.M.Smolovich, Proc. SPIE v.6732, p.67320D, 2007.
69. Fabrication of fibre Bragg gratings with 267 nm femtosecond radiation K.A. Zagorulko, P.G. Kryukov, Yu.V. Larionov, A.A. Rybaltovsky, E.M. Dianov, S.V. Chekalin, Yu.A. Matveets, V.O. Kompanets, OPTICS EXPRESS v.12, N24, p.5996-6001, 2004.
70. Коническая эмиссия фемтосекундного лазерного импульса при фокусировке аксионом в стекло K108. В.О. Компанец, С.В.Чекалин, О.Г.Косарева, А.Григорьевский, В.П.Кандидов, Квантовая электроника т. 36(9), с.821-824, 2006.
71. Improved reproducibility of conical emission from glass under axicon focusing of femtosecond laser pulse. S.V.Chekalin, V.O.Kompanets, O.G.Kosareva, A.Grigor'evsky, V.P.Kandidov, Proc. SPIE v.6733, P.67332I, 2007.
72. Диссоциация молекул CF_2HCl интенсивным излучением фемтосекундного лазера в ближней ИК области. В.М. Апатин, В.О. Компанец, В.Б. Лаптев, Ю.А. Матвеец, Е.А. Рябов, С.В. Чекалин, В.С. Летохов., Письма в ЖЭТФ, т.80, вып.2, с.104-106, 2004.
73. Decomposition of CF_2HCl molecules by femtosecond laser radiation V.M. Apatin, V.O. Kompanets, V.B. Laptev, Yu.A. Matveets, E.A. Ryabov, S.V. Chekalin and V.S. Letokhov, Chem. Phys. Letts. V.414, N2-3, pp.76-81, 2005.
74. Возбуждение и распад многоатомных молекул под действием ИК лазерного фемтосекундного излучения В.М. Апатин, В.О. Компанец, В.Б. Лаптев, Ю.А.Матвеец, Е.А. Рябов, С.В. Чекалин, В.С. Летохов, Химическая физика, т.26 №4, с. 18-25, 2007.

ОТДЕЛ СПЕКТРОСКОПИИ ТВЕРДОГО ТЕЛА



Отдел был организован в 1985 году (зав. отделом проф. Г.Н.Жижин). Первые годы в его состав входило две лаборатории: лаборатория спектроскопии кристаллов, созданной еще в 1969 году (зав. лабораторией д.ф.-м.н. Г.Н.Жижин) и лаборатория спектроскопии неупорядоченных структур (зав. лабораторией д.ф.-м.н. Е.А.Виноградов), созданной в 1984 году на базе сектора спектроскопии высокого разрешения, выделенного в 1982 году из лаборатории спектроскопии кристаллов. В настоящее время заведующий отделом – член-корреспондент РАН, профессор Е.А.Виноградов, зам. заведующего отделом – профессор Б.Н.Маврин. Сейчас в состав отдела входят две лаборатории: лаборатория спектроскопии конденсированных сред (заведующий лабораторией проф. Б.Н.Маврин), лаборатория спектроскопии полупроводниковых структур (зав. лабораторией чл.-корр. Е.А.Виноградов), и центр коллективного пользования по фурье-спектроскопии (руководитель центра проф. М.Н.Попова). Структура отдела с 1985 г. несколько раз изменялась в связи со сменой тематики, но основу его всегда составляли лаборатория спектроскопии кристаллов, созданная в начале 1969 г., и ставившая своей задачей развитие методов инфракрасной (ИК), длинноволновой инфракрасной (ДИК) спектроскопии, спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС) кристаллов органических и неорганических веществ, выявления физических принципов связи спектроскопических параметров со структурой и свойствами кристаллов, со строением молекул и молекулярных ионов, образующих твердотельные системы, спектроскопии поверхностных состояний твердых тел и поверхностных молекулярных образований на них (адсорбция, хемосорбция, коррозия и пр.), а также разработку новой автоматизированной спектральной аппаратуры, обеспечивающей широкий диапазон длин волн (1- 500 мкм) в сочетании с высоким разрешением ($0,001\text{ см}^{-1}$), высокой фотометрической точности (0,3 %) и с рекордно высокой детектирующей способностью к спектрам монослоевых и субмонослоевых поверхностных пленок органических и неорганических веществ на металлах и диэлектриках. Второй основной составляющей отдела была лаборатория молекулярной спектроскопии, организованной в 1969 г. (зав. лаб. к.ф.-м.н. Х.Е.Стерин) и преобразованной в 1987 г. в лабораторию колебательной спектроскопии конденсированных сред (зав.лабораторией д.ф.-м.н. Б.Н.Маврин). В этой лаборатории исследовались колебательные спектры кристаллов, аморфных материалов, новых углеродных материалов, пористых полупроводников, жидкостей и пленочных структур методами КРС и гиперкомбинационного рассеяния (ГКР) света с использованием низких температур и высоких давлений.

- Лаборатория спектроскопии конденсированных сред
- Лаборатория спектроскопии полупроводниковых структур
- Сектор фурье-спектроскопии высокого разрешения
- Монографии отдела
- Сайт отдела

Лаборатория спектроскопии конденсированных сред



Лаборатория спектроскопии конденсированных сред была создана в 1999 г. путем слияния лаборатории спектроскопии кристаллов ИСАН (зав. лабораторией проф. Г.Н.Жижин) и лаборатории колебательных спектров конденсированных сред ИСАН (зав. лабораторией дфмн Б.Н.Маврин). После перехода проф. Г.Н.Жижина на должность зам. директора в НТЦ УП в 2003 г. заведующим лабораторией спектроскопии конденсированных сред стал д.ф.-м.н. Б.Н.Маврин (на фото).

Исследования в лаборатории проводились по следующим основным направлениям:

- спектроскопия оптических фононов при фазовых переходах в органических, нелинейных, сверхпроводящих и суперионных кристаллах;
- спектроскопия поверхностных состояний;
- спектроскопия объемных поляритонов;
- спектроскопия гиперкомбинационного рассеяния в центросимметричных средах: кристаллах, стеклах и жидкостях;
- спектроскопия углеродных материалов при высоких давлениях;
- моделирование динамики решетки кристаллов;
- создание новой спектральной аппаратуры.

Спектроскопия фононов при фазовых переходах

Наиболее существенные достижения спектроскопии фазовых переходов в кристаллах органических и неорганических веществ: обнаружение ранее неизвестных фазовых переходов [1-6], предложение определять температурный ход параметра порядка в окрестности фазовых переходов по интенсивности фононных линий в ДИК и КРС [2-4], по давидовскому и Бете-расщеплениям внутримолекулярных колебаний [5], стабилизация сегнетофазы вблизи поверхности кристалла TiGaSe_2 [6], исследование влияния динамики протонов на спектры КРС и проявление туннелирования протонов и дейтонов в КРС нелинейных кристаллов $\text{Rb}(\text{D}_x\text{H}_{1-x})_2\text{PO}_4$ [7]. Отдельный цикл составляют исследования оптических фононов методами ИК спектроскопии и КРС полупроводниковых кристаллов $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{VI}}$, $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{VI}}$ и $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{III}}\text{C}_2^{\text{VI}}$ и их семейств твердых растворов (всего более 200 кристаллов), а также их перестроек с изменением гидростатического давления до 12 кбар в полупроводниковых кристаллах соединений $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{VI}}$, $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{III}}\text{C}_2^{\text{VI}}$ (около 50 составов), в некоторых из которых были обнаружены ранее неизвестные структурные фазовые переходы.

После открытия высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП) в тематике лаборатории появилось новое направление - спектроскопия ВТСП и родственных им материалов. Мы ставили перед собой задачу корректного получения и интерпретации спектров КРС (рис. 1), изучения взаимодействия электронного континуума с фононной подсистемой и корреляции между спектрами и сверхпроводящими свойствами ВТСП [8].

Исследованы температурные зависимости спектров КРС литийсодержащих суперионных кристаллов. Найдено, что при суперионном переходе кристалла LiNbGeO_5 ширины и положения частот испытывают аномалии.

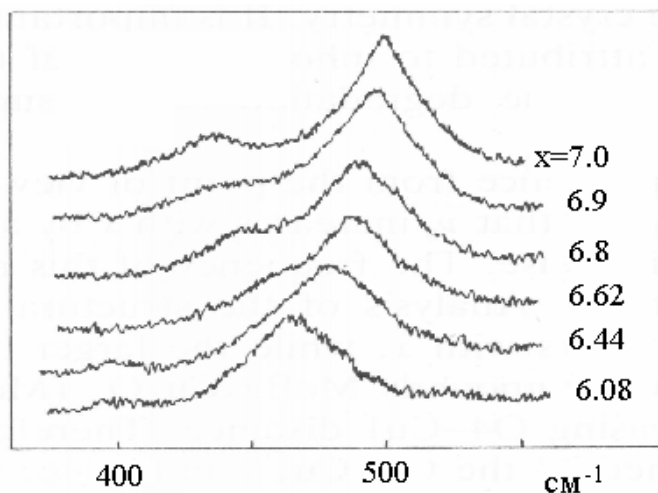


Рис.1. Зависимость спектра КРС Ag-мод от содержания кислорода в ВТСП-монокристаллах $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ [9].

Обнаружено, что с ростом температуры возникает интерференция однофононных оптических низкочастотных мод в кристалле $\gamma\text{-Li}_3\text{PO}_4$, сопровождающаяся антирезонансом. Численный анализ спектра в области взаимодействия мод показал сильную температурную зависимость константы взаимодействия, определяемой ангармонической связью оптических и акустических мод [10].

Исследован фазовый переход сегнетоэлектрик-антисегнетоэлектрик в

керамическом твердом растворе $\text{Li}_{0.12}\text{Na}_{0.88}\text{Ta}_{0.4}\text{Nb}_{0.6}\text{O}_3$. По спектрам КРС обнаружено существенное разупорядочение катионных подрешеток, а также аномальное поведение параметра порядка в окрестности фазового перехода [11].

Исследованы поляризованные фурье-спектры КРС в гидрофталатах К, Rb и Tl. Частоты внутренних колебаний молекулы гидрофталата отнесены к колебаниям ортофениленовой и карбоксильной групп. Замена К на Rb и Tl привела к незначительному низкочастотному сдвигу внутренних и внешних колебаний. В спектре частично дейтерированного гидрофталата калия обнаружен ряд дополнительных полос, свидетельствующих о частичном замещении атома водорода на дейтерий [12].

Изучены изменения в спектрах КРС релаксорного сегнетоэлектрика PLZT при облучении сильноточным импульсным пучком электронов. Показано, что при облучении происходит преобразование ромбоэдрической структуры образца в орторомбическую [13].

Для интерпретации спектров в лаборатории развиваются вычислительные методы анализа колебательных спектров кристаллов, основанные на применении эмпирических потенциалов межатомного взаимодействия (модель жестких ионов, оболочечная модель и др.) [14].

Лаборатория активно участвовала в создании первых отечественных спектрометров КРС с лазерным возбуждением (ДФС-24 и ДФС-42) (к.ф.-м.н. Х.Е.Стерин, проф. Б.Н.Маврин). В лаборатории были построены первые в стране оригинальные макеты лидара и установок для многоканальной и скоростной регистрации спектров КРС.

Спектроскопия поверхностных состояний

Физика поверхности и двумерных систем, а также прикладные проблемы, инициировали постановку экспериментальных исследований поверхностей и границ раздела сред. Выбор инфракрасной спектроскопии и КРС для этих целей объясняется их неразрушающим и невозмущающим характером, возможностью

применения не только в высоком вакууме, но и при высоких давлениях газа над поверхностью.

Изучены поверхностные фонон-поляритоны серии ионных и ионно-ковалентных кристаллов (около 30), исследовано влияние тонких проводящих диэлектрических слоев на характер дисперсионных кривых [15]. В ходе этих исследований обнаружено тушение поверхностных поляритонов пленкой металла, впервые подтверждено предсказанное теоретически расщепление линии поверхностного поляритона при резонансе с фононом переходного слоя, измерена корневая зависимость расщепления от толщины. Спектроскопия поверхностных поляритонов использована для получения оптических постоянных тонких пленок и переходных слоев на поверхности диэлектриков (пленки металлов и “искусственных диэлектриков” [15], слои после ионной имплантации поверхности кварца).

В лаборатории была развита спектроскопия поверхностных поляритонов методом КРС. Были исследованы дисперсия, частотный ход интенсивности и поляризационные свойства поверхностных поляритонов в спектрах КРС кристалла GaP [16]. Впервые были обнаружены семейства волноводных мод р- и s-типа ниже частоты ТО-фонона (рис. 2) и выше частоты LO-фонона, а также одна из нижних ветвей интерференционных мод в свободной пленке GaP [17].

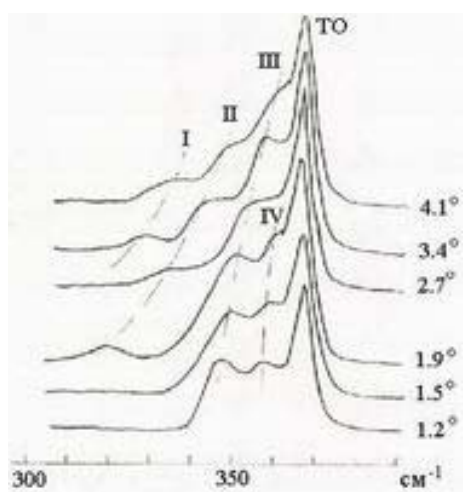


Рис.2. Зависимость спектров КРС на волноводных р-модах нижней ветви монокристаллической пленки GaP от угла рассеяния.

Впервые были исследованы спектры КРС сверхтонких аморфных сверхрешеток Si-SiO₂. Обнаружено усиление локализации ТО-моды по мере уменьшения толщины слоя Si. Обнаружены дополнительные особенности в спектрах, которые были отнесены за счет возникновения интерфейсных мод на границе слоев и эффектов размерного квантования (сложения акустических мод).

Обнаружены новые объемные и поверхностные фонон-плазмонные моды в спектрах КРС пористого кристалла InP [18]. Показано, что их возникновение может быть объяснено в приближении теории эффективной среды (модифицированной теории Максвелла-Гарнетта). Найдено, что поверхностное

электрическое поле в пористом легированном полупроводнике GaAs ответственно за нарушение правил отбора не только для КРС на LO-фононах за счет фрелиховского механизма, но и для КРС на ТО-фононах за счет понижения полной симметрии приповерхностного слоя в порах в присутствии поверхностного электрического поля. По спектрам КРС осуществлена идентификация побочных продуктов на поверхности пористых полупроводников GaAs и GaSb, полученных электрохимическим травлением в растворах различных кислот.

Термическая стабильность, изменения структуры и фазового состава сверхтвердых покрытий Ti-Cr-B-N изучены после отжига при 800° С. Обнаружены сдвиг частот и увеличение интенсивности полос, что отнесено за счет снятия напряжений и увеличения размеров микрокристаллитов [19]. В спектрах многофункциональных биоактивных пленок Ti-Ta-C-Ca-P-O обнаружены полосы, которые отнесены к фазам TiC, TiO_x, а также к алмазоподобной структуре [20].

Спектроскопия объемных поляритонов

КРС является эффективным методом исследования объемных колебательных поляритонов, позволяющих получить дисперсионные характеристики в диапазоне волновых векторов 10^3 - 10^5 см^{-1} , восстановить тензор диэлектрической проницаемости, изучить взаимодействие поляритонов с многочастичными фононными состояниями в кристаллах без центра инверсии. В лаборатории были разработаны методы как ω -, так и к-спектроскопии поляритонов [21,22], измерена дисперсия поляритонов в ряде кристаллов, проанализированы ширина и форма линии комбинационного рассеяния и исследованы ангармоничность и влияние двухчастичных состояний на дисперсию поляритонов [23].

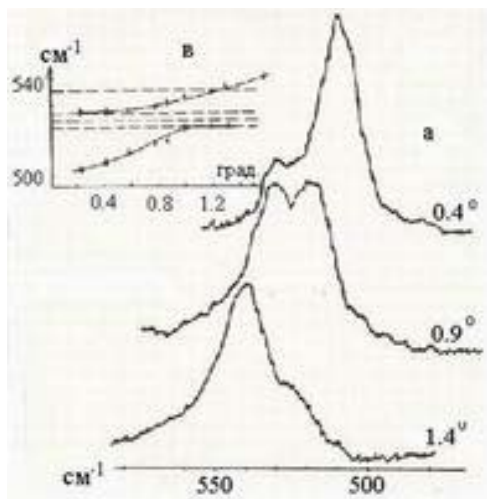


Рис.3. а – КРС-дублеты ферми-резонанса поляритона с двухфононной зоной в кристалле LiNbO_3 ; в - зависимость $\omega(q)$ в области ферми-резонанса.

КРС на поляритонах было использовано для анализа эффекта сильного ангармонизма фононов, приводящего к образованию связанных состояний (бифононов) вблизи двухчастичной зоны фононов. Если этот ангармонизм достаточно велик и состояние бифонона образуется, то при пересечении поляритонной ветвью области двухфононной зоны в поляритонном спектре из-за ферми-резонанса возникает щель, величина которой пропорциональна константе ангармонизма фононов. Нами экспериментально был обнаружен дублет ферми-резонанса поляритона с составным тоном (рис. 3) в кристалле LiNbO_3 [24].

Гиперкомбинационное рассеяние света

При достаточно интенсивном облучении среды светом с частотой ω_i в области удвоенной частоты $2\omega_i$ можно наблюдать гиперкомбинационное рассеяние света (ГКР) на колебательных возбуждениях среды. Интенсивность ГКР квадратично зависит от интенсивности возбуждающей волны и, таким образом, является нелинейным процессом, связанным с кубической нелинейностью среды. Согласно правилам отбора в ГКР могут быть активны колебания, запрещенные как в КРС, так и в ИК поглощении. Важной особенностью ГКР является активность дипольных колебаний во всех средах.

Одним из главных достижений лаборатории является развитие метода спектроскопии ГКР [25]. С помощью этого метода обнаружены запрещенные в КР и ИК поглощении колебания, определены оптические и молекулярные параметры ряда материалов.

Обнаружены поляритоны [26-28] и продольно-поперечное расщепление дипольных колебаний в стеклах и жидкостях [29], поляритонные Ферми-резонансы (рис.4) и поляритон-колебательные резонансы в центросимметричных средах.

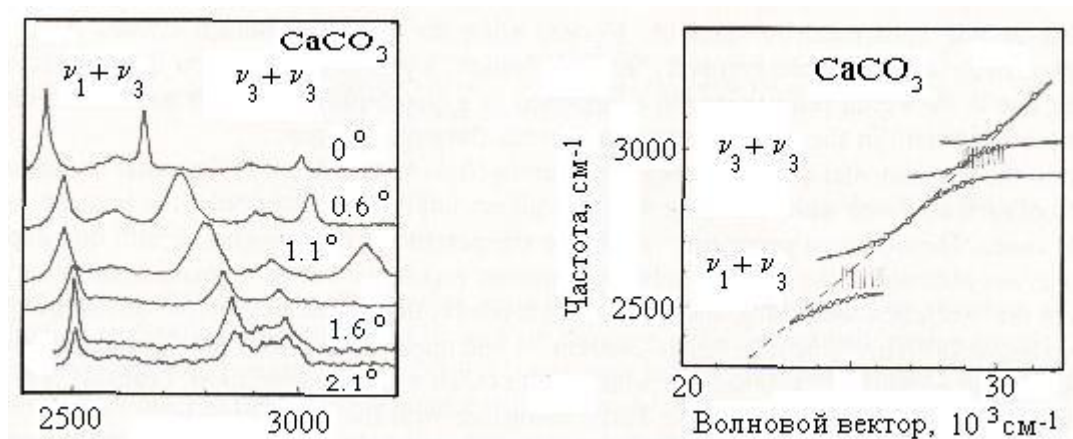


Рис. 4. Спектры ГР (слева) и дисперсия Е1-поляритонов (справа) в области двухфотонных состояний кальцита [30].

ГР – единственно возможный метод исследования объемных поляритонов и связанных с ними эффектов в centrosymmetric средах. С помощью ГР исследованы низкочастотные спектры дипольных мягких мод в centrosymmetric кристаллах, которые запрещены в КРС и трудно исследуемы в ИК поглощении. В ГР впервые стали доступны изучению пространственные эффекты (зависимость спектра от величины и направления волнового вектора) в стеклах и жидкостях. Предложена и обоснована новая интерпретация колебательных спектров стекол и жидкостей, исходя из усредненной симметрии среды [31].

Спектроскопия углеродных материалов под давлением

В последние годы важным направлением в работе лаборатории стали исследования фазовых переходов углеродных материалов под давлением совместно с Технологическим Институтом Сверхтвердых Новых Углеродных Материалов (проф. Бланк В.Д.). Развиваются два метода оптических исследований материалов: в алмазных ячейках квазистатического давления до 110 ГПа с приложением сдвиговых деформаций и после воздействия “давление - нагрев - сдвиговые деформации” в объемной камере высокого давления до 15 ГПа и 2100 К. Приложение сдвиговой деформации уменьшает гистерезис структурных фазовых переходов и позволяет получить более однородную фазу.

По спектрам КРС впервые было обнаружено несколько метастабильных фаз фуллерена C_{60} с ростом давления, причем при давлениях выше 20 ГПа метастабильная фаза обладала высокими механическими характеристиками, что позволило предположить высокую степень полимеризации молекул по схеме 2+2 присоединения [32]. Результаты дифракционных и спектроскопических исследований и измерения твердости также подтвердило необратимое превращение молекулярного фуллерита C_{70} в сверхтвердую аморфную фазу при высоких давлениях и комнатной температуре, причем этот фазовый переход происходил при более низких давлениях в случае приложения сдвиговой деформации [33].

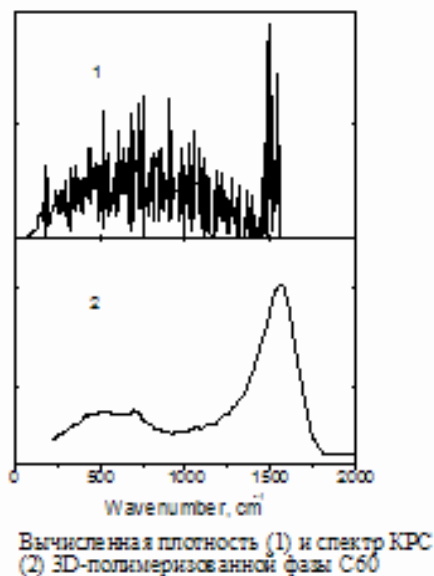


Рис. 5. Вычисленная плотность колебательных состояний (вверху) и спектр КРС (внизу) 3D-полимеризованной фазы C₆₀ [34].

сдвига. Предположено, что появление полосы КРС в области 1400-1500 см⁻¹, характерной для пентагонов в фуллереновых структурах, является спектроскопическим признаком образования онионов в данных условиях, а ее расщепление на дублет указывает на присутствие гептагонов в слоях [35].

Приложение сдвиговой деформации к однослойным углеродным нанотрубкам при давлении выше 35 ГПа приводило к десятикратному увеличению интенсивности КРС. После снятия давления положение максимума G-моды указывало на образование значительного количества sp³-связей в полученном материале, что подтверждалось наблюдением люминесценции с максимумом вблизи 2 эВ и высокой твердостью образца, сравнимой с твердостью BN [36].

Используя лазерное излучение 1.06 мкм для возбуждения спектров КРС, резонансное усиление КРС было получено лишь для полупроводниковых углеродных нанотрубок NiPCO и исследованы зависимости спектров полупроводниковых нанотрубок от квазистатического давления до 30 кБар. Из спектров определены диаметры и хиральности нанотрубок, а также модовые параметры Грюнайзена [37].

Литература

1. Г.Н.Жижин. Спектроскопия низкотемпературных кристаллических фаз органических веществ. Кристаллография, 18, N 4, 769-778 (1973).
2. Н.И.Афанасьева, В.М.Бурлаков, Г.Н.Жижин. Фононный спектр в окрестности фазового перехода кристалл-нематический жидкий кристалл и параметр порядка. Письма в ЖЭТФ, 23, N 9, 508-509 (1976).
3. Г.Н.Жижин, Ю.К.Красюков, Э.И.Мухтаров, В.Н.Роговой. Анизотропия вращательных переориентаций циклогексана вблизи фазового перехода. Письма в ЖЭТФ, 28, N 7, 465-468 (1978).
4. Е.А.Виноградов, Г.Н.Жижин. Излучение кристаллической решетки циклогексана на частоте 55 см⁻¹ при фазовом переходе. Физика твердого тела, 18, N 9, 2826-2827 (1976).

5. G.N.Zhizhin, E.I.Mukhtarov, "Optical spectra and lattice dynamics of molecular crystals", *Vibrational spectra and structure* (ed. J.R.Durig), vol.21, pp.447, Elsevier, Amsterdam, 1995.
6. Н.И.Агладзе, Б.П.Антонюк, В.М.Бурлаков, Е.А.Виноградов, Г.Н.Жижин. "Структурный фазовый переход в приповерхностном слое". *ФТТ*, 23, с.3289-3298, 1981.
7. Б.Н.Маврин, Х.Е.Стерин, Л.Н.Рашкович, А.В.Мищенко. Низкочастотный спектр и туннелирование протонов (дейтонов) в кристаллах $\text{Rb}(\text{D}_x\text{H}_{1-x})\text{PO}_4$. *ФТТ*, 15, 3702 (1973).
8. V.N.Denisov, A.F.Goncharov, B.N.Mavrin, V.B.Podobedov. Raman scattering in high- T_c superconductors $\text{Yb}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ with different oxygen contents. In: *Laser Optics of Condensed Matter*. (Ed. E.Garmire, A.Maradudin, K.Rebane), Plenum Press, New York, 1991.v.2, p. 131.
9. V.N.Denisov, B.N.Mavrin, V.B.Podobedov. Raman spectroscopy of the high temperature superconducting YBa_2CuO_x single crystals and films. *Phys.Rep.*, 194, 397 (1990).
10. Б.Н.Маврин, В.В.Асонов, В.В.Фомичев, А.К.Иванов-Шиц, В.В.Киреев. Комбинационное рассеяние света, взаимодействие и интерференция оптических колебаний в суперионном кристалле $\gamma\text{-Li}_3\text{PO}_4$. *ЖЭТФ*, 123, 64 (2003).
11. Н.В.Сидоров, М.Н.Палатников, Н.А.Голубятник, В.Т.Калинников, Б.Н.Маврин, В.В.Асонов. Проявление фазового перехода сегнетоэлектрик-антисегнетоэлектрик в $\text{Li}_{0.12}\text{Na}_{0.23}\text{Ta}_{0.4}\text{Nb}_{0.6}\text{O}_3$ в спектрах КРС. *Оптика и спектроскопия*, 97, 413 (2004).
12. Б.Н.Маврин, М.В.Колдаева, Р.М. Закалюкин, Т.Н.Турская. Спектроскопия КРС гидрофталатов калия, рубидия и таллия. *Оптика и спектроскопия*, 100, 943 (2006).
13. V.V.Efimov, K.Yakubovskii, D.I.Kochuley, A.Kuzmin, B.N.Mavrin, S.I.Tutunnikov. EXAFS, X-ray diffraction and Raman studies of $(\text{Pb}_{1-x}\text{La}_x)(\text{Zr}_{0.65}\text{Ti}_{0.35})\text{O}_3$ ceramics irradiated by high-current pulsed electron beam. *J.Phys.Chem.Solids*, 67, 2007 (2006).
14. V.N.Denisov, A.N.Ivlev, A.S.Lipin, B.N.Mavrin, V.G.Orlov. Raman spectra and lattice dynamics of Bi_2O_3 . *J.Phys.:Cond.Mat.*, 9, 4967 (1997).
15. Е.А.Виноградов, Г.Н.Жижин, М.А.Москалева, В.А.Яковлев. Application of surface polaritons for vibrational spectroscopic studies of and very thin films. *Applied Spectroscopy Reviews*, 18, N 2, 171-262 (1982-83).
16. В.Н.Денисов, Б.Н.Маврин, В.Б.Подобедов. Комбинационное рассеяние на поверхностных поляритонах кристалла GaP: дисперсия, интенсивность и поляризационные свойства. *ЖЭТФ*, 92, 1855 (1987).
17. В.Н.Денисов, Т.А.Лескова, Б.Н.Маврин, В.Б.Подобедов. Спектры КР на волноводных и интерференционных модах свободной пленки GaP. *ЖЭТФ*, 94, 261 (1988).
18. V.N.Denisov, B.N.Mavrin, V.A.Karavanski. New bulk and surface phonon-plasmon modes in Raman spectra of porous n-InP. *Phys.Lett.*, A259, 62 (1999).
19. Ph.V.Kiryukhantsev-Korneev, D.V.Shtansky, N.I.Petrzhik, E.A.Levashov, B.N.Mavrin. Thermal stability and oxidation resistance of Ti-B-N, Ti-Cr(Si)-B-N and Ti-Al-Si-B-N films. *Surface & Coating Technology*, 201, 6143 (2007).
20. D.V.Shtansky, N.A.Gloushenkova, I.A.Bashkova, M.A.Kharitonova, T.G.Moizhess, A.N.Sheveiko, Ph.V.Kiryukhantsev-Korneev, A.Osaka, B.N.Mavrin, E.A.Levashov. Ta-doped multifunctional bioactive nanostructured films, *Surface & Coating Technology*, 202, 3615 (2008).
21. Б.Н.Маврин, Х.Е.Стерин. Ширина и форма линии КРС на поляритонах. В: *Современные проблемы спектроскопии комбинационного рассеяния света* (ред. М.М.Сущинский). Наука, М., 1978, с.48.

22. E.A.Vinogradov. "Vibrational Polaritons in Semiconductor Films on Metal Surfaces". *Physics Reports*, 217, No.4, p. 159-223, 1992.
23. Б.Н.Маврин, Х.Е.Стерин. Двухчастичные состояния и спектр поляритонов в кристалле GaP. *ФТТ*, 18, 3028 (1976).
24. Б.Н.Маврин, Х.Е.Стерин. Ферми-резонанс поляритона с бифононом в кристалле LiNbO₃. *Письма в ЖЭТФ*, 16, 265 (1972).
25. V.N.Denisov, B.N.Mavrin, V.B.Podobedov. Hyper-Raman scattering by vibrational excitations in crystals, glasses and liquids. *Phys.Rep.*, 151, 1 (1987).
26. В.Н.Денисов, Б.Н.Маврин, В.Б.Подобедов, Х.Е.Стерин. Гиперкомбинационное рассеяние на поляритонах в centrosymmetric кристалле SrTiO₃. *Письма в ЖЭТФ*, 31, 111 (1980).
27. В.Н.Денисов, Б.Н.Маврин, В.Б.Подобедов, Х.Е.Стерин. ГР на поляритонах в жидком четыреххлористом углероде. *Письма в ЖЭТФ*, 35, 312 (1982).
28. В.Н.Денисов, Б.Н.Маврин, В.Б.Подобедов, Х.Е.Стерин. Гиперкомбинационное рассеяние на поляритонах в плавленом кварце. *Письма в ЖЭТФ*, 32, 340 (1980).
29. В.Н.Денисов, Б.Н.Маврин, В.Б.Подобедов, Х.Е.Стерин. Гиперкомбинационное рассеяние и продольно-поперечное расщепление колебаний в плавленом кварце. *ФТТ*, 20, 3485 (1978).
30. В.Н.Денисов, Б.Н.Маврин, В.Б.Подобедов, Х.Е.Стерин. Эффекты ангармонизма в поляритонных спектрах ГР кристалла кальцита. *ЖЭТФ*, 82, 406 (1982).
31. В.Н.Денисов, Б.Н.Маврин, В.Б.Подобедов, Х.Е.Стерин. ГР и правила отбора по волновому вектору и матричному элементу в колебательных спектрах стекол и жидкости. *ЖЭТФ*, 84, 1266 (1983).
32. V.Blank, M.Popov, S.Buga, V.Davydov, V.N.Denisov, A.N.Ivlev, B.N.Mavrin. Is C₆₀ fullerite harder than diamond? *Phys.Lett.*, A188, 281 (1994).
33. В.Д.Бланк, К.В.Гоголинский, В.Н.Денисов, В.А.Ивденко, Б.Н.Маврин, Н.Р.Серебряная, С.Н.Сульянов. Механические, структурные и спектроскопические свойства фаз фуллерита, полученных при высоком давлении со сдвиговой деформацией. *ЖТФ*, 72, 49 (2002).
34. L.A.Chernozatonskii, N.R.Serebryanaya, B.N.Mavrin. The superhard crystalline three-dimensional polymerized C₆₀ phase. *Chem.Phys.Lett.*, 316, 199 (2000).
35. V.D.Blank, V.N.Denisov, A.N.Kirichenko, B.A.Kulnitsky, S.Yu.Martushov, B.N.Mavrin, I.A.Perezhogin. High pressure transformation of single-crystal graphite to form molecular carbon-onions. *Nanotechnology*, 18, 345601 (2007).
36. V.D.Blank, V.N.Denisov, A.N.Kirichenko, N.A.Lvova, S.Yu.Martushov, B.N.Mavrin, D.M.Popova, M.Yu.Popov, E.V.Tatyanin, A.A.Zakhidov. Nanostructured superhard carbon phase obtained under high pressure with shear deformation from single-wall nanotubes HiPCO. *Physica B:Cond.Mat.*, 382, 58 (2006).
37. В.Д.Бланк, В.А.Ивденко, А.С.Лобач, Б.Н.Маврин, Н.Р.Серебряная. Фурье-спектры КРС однослойных углеродных нанотрубок HiPCO-SWNT при высоком давлении. *Оптика и спектроскопия*, 1006 282 (2006).

Лаборатория спектроскопии полупроводниковых структур

Лаборатория спектроскопии полупроводниковых структур создана в апреле 1990 года (заведующий лабораторией чл.-корр., профессор Е.А.Виноградов). Основу её составили сотрудники лаборатории спектроскопии кристаллов ИСАН (тогда руководитель проф. Г.Н.Жижин), работавшие ранее с Е.А.Виноградовым, а в 2001 году в лабораторию вошла тематическая группа спектроскопии поверхности твердого тела, возглавляемая проф. В.А.Яковлевым. Основные достижения сотрудников лаборатории можно кратко сформулировать следующим образом.

Разработаны методы экспериментального исследования угловой зависимости спектров термостимулированного ИК излучения кристаллов и пленок и восстановления из них дисперсии объемных и поверхностных поляритонов. Были изучены колебательные поляритоны и плазмон-поляритоны в тонкопленочных структурах типа “вакуум - пленка полупроводника - металлическая подложка” и “призма НРВО - вакуумный зазор - пленка полупроводника - металл” [1-7]. Экспериментально было обнаружено термостимулированное свечение на частотах нерадиационных поверхностных поляритонов кристаллов полупроводников, металлов и полупроводниковых пленок на металлических подложках при наличии призмы НРВО над объектом [2-7]. Показано, что в структурах типа “призма НРВО - зазор - металл” и “пленка полупроводника на металле” изначально нерадиационный поверхностный плазмон металла преобразуется в набор радиационных состояний, электромагнитное поле которых определяется всеми дипольно-активными возбуждениями каждого вещества структуры и, кроме того, зависит от реальной геометрии эксперимента [4,6].

Эти результаты экспериментальных и теоретических исследований ИК спектров кристаллов и пленок свидетельствуют также о том, что в кристаллах конечных размеров поглощение света осуществляется не в один шаг. Поглощение света происходит в два шага – фотоны, проникая в кристалл, превращаются в промежуточное состояние электромагнитного поля в кристалле – радиационные поляритоны и уже эти поляритоны взаимодействуют со всей совокупностью дипольно-активных состояний кристалла. В результате этого

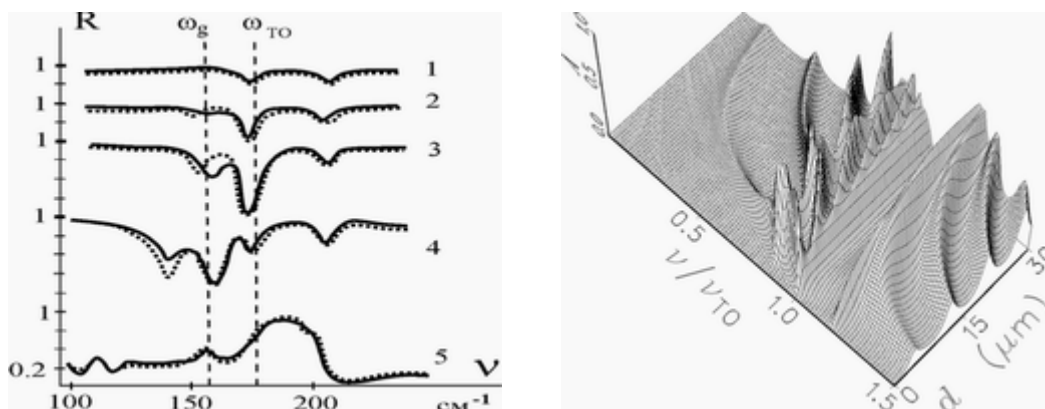


Рис.1. а - Спектры р-поляризованного отражения-поглощения пленок $\text{Cd}_{0.05}\text{Zn}_{0.95}\text{Te}$ на Al, угол падения света $\varphi = 20^\circ$, толщина пленок $\text{Cd}_{0.05}\text{Zn}_{0.95}\text{Te}$:

1 – $d = 0,9$ мкм, 2 – $d = 1,7$ мкм, 3 – $d = 2,3$ мкм, 4 – $d = 5$ мкм, 5 – $d = 700$ мкм.

Точки - эксперимент, сплошные линии – расчет без подгоночных параметров [4,6];

б – зависимость р-поляризованного поглощения пленок $\text{Cd}_{0.05}\text{Zn}_{0.95}\text{Te}$ на Al от толщины пленок, $\varphi = 20^\circ$, расчет [4,6].

взаимодействия поляритоны превращается в фононы или в многофононные возбуждения, экситоны или свободные электроны (дырки) или в плазмоны металлической подложки. Поглощение света при этом определяется вероятностями радиационного и ангармонического распадов поляритонов [6].

Обнаружены также эффекты сильного резонансного взаимодействия между интерференционными модами (модами полости) в пленках $\text{Cd}_{0.05}\text{Zn}_{0.95}\text{Te}$ и дипольными колебаниями примесных атомов Cd (атомы в полости), замещающих атомы Zn в ZnTe. Это резонансное взаимодействие приводит к увеличению интегрального поглощения локальными колебаниями примесных атомов полости более чем в 10^5 раз [4,6]. Обнаружены эффекты взаимодействия между возбуждениями в граничащих средах, а также с интерфейсными плазмонами [4,6].

Методами колебательной спектроскопии исследованы сегнетоэлектрические фазовые переходы в слоистых полупроводниках типа TlInS_2 и TlGaSe_2 . Обнаружены и исследованы новые особенности колебательного

спектра в окрестности температуры структурных фазовых переходов, связанные с влиянием квазистатических флуктуаций параметра порядка. Результатом этого влияния является гауссова форма фононных полос поглощения и линий КРС [8-12]. Обнаружены также новые особенности структурного фазового перехода вблизи поверхности полупроводника. Экспериментально установлено, что поверхность может стабилизировать низкотемпературную фазу кристалла в некотором приповерхностном слое значительной толщины (~ 1 мкм) [8,12].

Экспериментальные исследования динамики волн зарядовой плотности (ВЗП) в кристаллах $(\text{TaSe}_4)_2\text{I}$ и численное моделирование динамики солитонов типа кинка позволили выяснить природу гигантского ИК активного колебания, присутствующего во многих неорганических системах с ВЗП [13,14]. Аналитические и численные исследования динамики ангармонических решеток под действием внешнего гармонического возбуждения выявили замечательное свойство - формирование диссипативных структур (ДС), представляющих собой одно- или двумерную решетку так называемых ангармонических локальных колебаний. Установлено, что причинами возникновения и стабильности ДС являются модуляционная неустойчивость нелинейных плоских волн [15,16] и деструктивная интерференция модуляционных неустойчивостей нелинейных волн в решетке [17].

Были исследованы оптические свойства сверхрешеток на основе чередующихся ультратонких (~ 1 нм) слоев аморфного кремния и двуокиси кремния. По спектрам

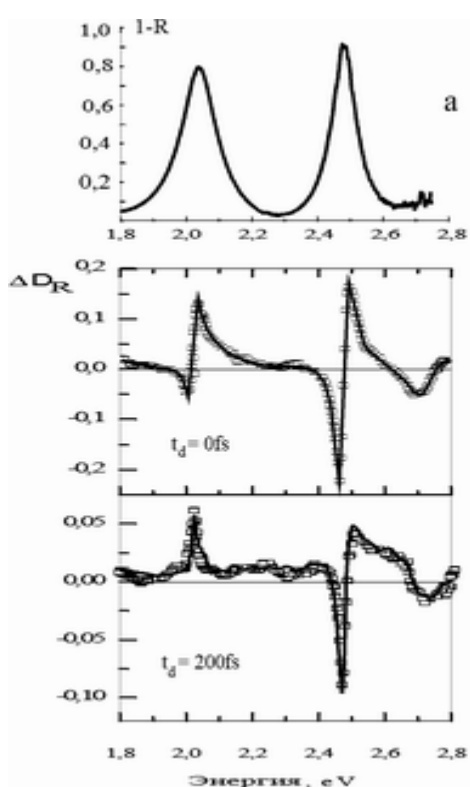


Рис.2. а - Спектр отражения-поглощения интерференционными модами пленки ZnSe толщиной 400 нм на хrome. б – Временная эволюция спектров разностного отклика пленки ZnSe (400 нм) на Сг подложке. Энергия фотона возбуждения $\hbar\omega_{pu1} = 2,34$ эВ меньше ширины запрещенной зоны в пленке ZnSe. Длительность импульсов накачки и зондирования – 50 фс. t_d – время задержки между ними. Квадраты – экспериментальные данные, сплошные линии – аппроксимация с использованием двух экспоненциальной функции отклика [6,23].

фотолюминесценции и спектрам возбуждения фотолюминесценции, а также из спектров λ -модуляционного поглощения света была определена структура электронных уровней размерного квантования в сверхрешетках [18]. Показано, что короткопериодические сверхрешетки обладают строго двумерной структурой размерно-квантованных уровней подзон кремния и, что процессы рекомбинации неравновесных носителей заряда в них определяются в первую очередь вероятностями резонансного переноса носителей заряда из уровней подзон кремния на глубокие примесные уровни германия в барьерных слоях двуокиси кремния [19-20].

Методами фемтосекундной спектроскопии проведены исследования электромагнитных мод полости и их взаимодействия с внешним электромагнитным полем. Исследования фотоиндуцированной перестройки мод полости в пленках ZnS и ZnSe на Cr, Ni и Cu показали, что под действием ультракоротких лазерных импульсов оптическая толщина полости и граничные условия для мод полости могут изменяться за время в несколько фемтосекунд [22-25]. Спектры (рис. 2,б) свидетельствуют о сверхбыстрой фотоиндуцированной эволюции мод полости, приводящей к сдвигу их спектра поглощения за время порядка длительности импульса накачки, что открывает возможности детектирования сверхбыстрого фотовольтаического эффекта в структурах с барьером Шоттки [25].

Сочетание методов оптической спектроскопии с развиваемой в лаборатории туннельной микроскопией и оптической микроскопией ближнего поля позволило исследовать фундаментальные вопросы формирования локализованных состояний электромагнитного поля в среде и их взаимодействие со светом. Исследование данных локализованных состояний важно для развития новых методов безапертурной микроскопии ближнего поля [26-28]. Был предложен и экспериментально реализован новый метод увеличения пространственного разрешения безапертурного микроскопа ближнего поля. Улучшение разрешения достигнуто за счет возбуждения локальных плазмонов в системе игла-поверхность, когда игла и поверхность изготовлены из благородных металлов. Возбуждение локальных плазмонов наблюдалось при регистрации оптического сигнала на удвоенной частоте модуляции промежутка острие-поверхность. Достигнутое оптическое разрешение меньше, чем радиус острия иглы [27]. С помощью созданного сканирующего плазмонного ближнеполевого микроскопа и пространственного Фурье-преобразования ближнеполевых изображений были зарегистрированы процессы рассеяния поверхностных плазмонов на шероховатой поверхности серебра, в том числе процессы усиленного обратного рассеяния [28].

Тематическая группа спектроскопии поверхности твердого тела

Основное направление - экспериментальное исследование колебательных спектров тонких пленок, поверхностей и границ раздела сред, инициированное как научными задачами физики двумерных систем, так и прикладными проблемами. Наряду с широко распространенными методами ИК спектроскопии: пропускание, отражение (включая отражательно-абсорбционную спектроскопию), нарушенное полное внутреннее отражение, в лаборатории разработан и используется метод спектроскопии поверхностных электромагнитных волн (ПЭВ). Благодаря преимуществам спектроскопии ПЭВ был достигнут значительный прогресс в исследовании сверхтонких пленок и поверхностей твердого тела [1,29]. Измерение параметров распространения ПЭВ позволяет вычислять по ним как мнимую, так и действительную части диэлектрической проницаемости

исследуемых объектов (металлических и диэлектрических поверхностей, тонких пленок диэлектриков и металлов) [30]. Так, было показано, что измерение комплексного волнового вектора ПЭВ позволяет определить коэффициент отражения металлических зеркал с высокой точностью [31].

Исследования ПЭВ начались в 10 мкм области спектра [1], затем распространение ПЭВ по металлам исследовалось на дискретных частотах в ближней ИК и видимой областях [32]. В последние годы спектральный диапазон значительно расширился в связи с использованием фурье-спектрометров [33] и лазера на свободных электронах, перестраиваемого в широком ИК диапазоне: 5-100 мкм. С использованием лазера на свободных электронах были получены высококачественные спектры монослоевых пленок Лэнгмюра-Блоджетт на поверхности золота, определена комплексная диэлектрическая проницаемость тонких (толщиной порядка нанометра) пленок “карилона” в широкой спектральной области по параметрам распространения ПЭВ [34]. Методом фазовой спектроскопии ПЭВ в длинноволновой ИК области в окрестности фононных резонансов исследованы приповерхностные слои кристаллов CaF_2 , BaF_2 , MgO , LiNbO_3 . Определены параметры распространения ПЭВ и по ним рассчитаны оптические постоянные исследованных кристаллов [35].

Высокая пиковая мощность лазера на свободных электронах позволила исследовать нелинейные эффекты при распространении ПЭВ. При возбуждении встречных поверхностных фонон-поляритонов на дифракционной решетке, сформированной на поверхности кварца излучением 9 мкм, получена генерация второй гармоники, идущая из приповерхностного слоя кварца в направлении, перпендикулярном ее плоскости. Изучены частотная зависимость и влияние тонкой органической пленки на эффективность генерации второй гармоники [36]. Была исследована генерация суммарной частоты (ГСЧ) видимого (0,5235 мкм) и ИК (10 мкм) излучений на гладкой и гофрированной поверхностях серебра. Одновременное возбуждение поверхностного плазмон-поляритона как на частоте видимого лазера, так и на суммарной частоте позволило усилить сигнал суммарной частоты на гофрированной поверхности более чем на четыре порядка по сравнению с сигналом ГСЧ на гладкой поверхности серебра [37,38]. В этих условиях получены ограниченные участки спектра сверхтонких пленок (толщиной около 5 нм) медного фталоцианина, фуллерена и уротропина на поверхности серебра.

Была исследована зависимость колебательных спектров от толщины сверхтонких пленок (фуллерен и фталоцианин) на серебре методами отражательно-абсорбционной спектроскопии и ГСЧ с возбуждением поверхностных поляритонов. Показано, что вклад в ГСЧ дает только граница раздела пленка - металл, что подтверждает сохранение центральной симметрии в объеме пленок [39].

При изучении оптических и электрических свойств сверхтонких пленок ряда металлов (Nb, Cu, Ni, W, Mo, Ti), полученных высокочастотным распылением, обнаружены квантово-размерные осцилляции проводимости и оптических постоянных при изменении толщины пленки. Период осцилляций зависит только от природы металла, он близок к фермиевской длине волны электрона [40,41].

Изучались и другие объекты, интересные с точки зрения квантовых эффектов: сверхрешетки, а также пористый кремний [42,43]. Экспериментально исследована спектральная зависимость интенсивности генерации второй гармоники в одномерном фотонном кристалле на основе пористого кремния. Обнаружено гигантское усиление второй гармоники вблизи резонаторной моды и края запрещенной фотонной зоны, благодаря как локализации излучения за счет многолучевой интерференции, так и двухфотонному резонансу. Получен спектр

генерации суммарной частоты в области СН-валентных колебаний монослоя тиопептида, а также адсорбированных на поверхности металла молекул гексаметилентетрамина и тиола, благодаря значительному усилению сигнала при одновременном возбуждении ПП как на частоте видимого лазера, так и на суммарной частоте. Показано, что создание «примесных» уровней в запрещенной зоне фотонных кристаллов приводит к концентрации электромагнитного поля вблизи дефекта и, как следствие этого, к усилению линейных (поглощение и КРС) и нелинейно-оптических эффектов в таких структурах. Получены спектры ГСЧ SiH колебаний монослоя водорода в фотонных кристаллах на основе пористого кремния [44-46].

Экспериментально и теоретически изучены параметры распространения поверхностных плазмонов (ПП) на гофрированной поверхности вблизи энергетической щели, открывающейся при береговом условии отражения при условии, когда ширина береговой щели больше энергетического расстояния между световой прямой и кривой дисперсии ПП. Используя интерференционный метод фазовой спектроскопии ПП, впервые проведены измерения комплексного волнового вектора ПП вблизи береговой щели. Предложена физическая модель взаимодействия ПП с объемным излучением и получено аналитическое выражение для волнового вектора ПП вблизи открывающейся щели на основе формализма связанных мод. Аналитическое выражение, полученное на основе этой модели, может быть использовано для определения формы дисперсионной кривой ПП вблизи береговой щели, возникающей на реально используемых решетках. Данная теоретическая модель хорошо описывает полученные экспериментальные данные, а также позволяет объяснить возникновение дополнительных минимумов в угловых зависимостях пропускания ПП гофрированными решетками, неоднократно наблюдавшихся в различных работах [47].

В последние пять лет усилия сотрудников лаборатории сконцентрированы в основном на следующих направлениях работ:

1. Экспериментальные и теоретические исследования квантовой электродинамики микрополости, оптики ближнего поля и процессов превращения ближнего поля в электромагнитное излучение;
2. Экспериментальные исследования оптических фононов в новых материалах;
3. Разработка новых методов изучения поверхности твердых тел и границ раздела «твердое тело–жидкость» с использованием поверхностных электромагнитных волн;
4. Разработка методики применения двухканального фурье-спектрометра ближнего и среднего спектрального диапазона для количественного анализа компонентов мелкодисперсных структур (молочных продуктов, фармакологических препаратов);
5. Создание Фурье-спектрометров для ближней и средней ИК области спектра.

В первом направлении методом фемтосекундной спектроскопии "накачка – широкополосное зондирование" выполнены исследования релаксации неравновесных носителей заряда в пленке полупроводникового соединения ZnSe на металлических подложках из алюминия, меди и хрома для энергии возбуждающих квантов больше и меньше ширины запрещенной зоны ZnSe. В качестве чувствительного механизма использовалось измерение спектров поглощения на частотах мод микрополости (интерференционные моды в тонкой пленке полупроводника на металле в области прозрачности пленки $\hbar\omega < E_g$).

Обнаружены эффекты фотонаведенного изменения диэлектрической проницаемости пленки, приводящие к красному сдвигу поляритонов, и фотонаведенные изменения диэлектрической проницаемости металлической подложки, приводящие к синему сдвигу интерференционных поляритонов [48,49].

Рассмотрена модель Бозе-Эйнштейновской конденсации поляритонов, возбуждаемых во внутрирезонаторной ячейке с резонансными атомами, проявляющаяся в спектральных характеристиках такой системы. Показано, что возникает эффект «конденсации» широкополосного спектра генерации вблизи сильных линий поглощения в лазерном резонаторе, наблюдавшийся многократно в экспериментах при комнатных температурах [50].

В лаборатории к традиционным исследованиям относятся экспериментальные исследования оптических фононов в кристаллах и новых материалах, в частности, изучены особенности перестройки колебательного спектра в системе твердых растворов $\text{ZnS}_{1-x}\text{Se}_x$ и $\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Se}$ для $0 \leq x \leq 1$.

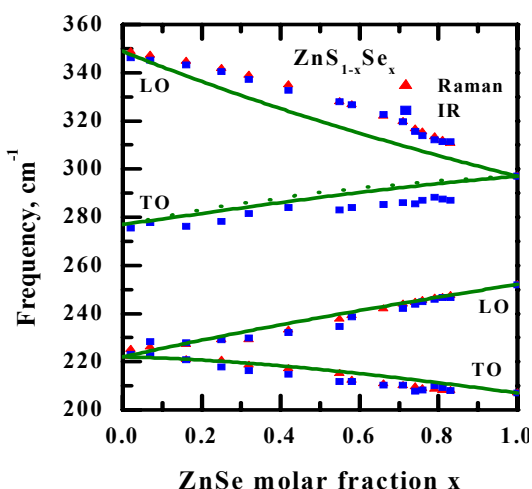


Рис. 3. Дисперсия основных мод в кристаллах $\text{ZnS}_{1-x}\text{Se}_x$. Сплошные кривые – расчет в приближении модели изосмещений. Концентрационные зависимости ZnS- и ZnSe-подобных TO и LO мод однозначно интерпретируется как двухмодовое поведение основных TO-LO мод.

В области частот между ZnS-подобными TO- и LO-фононами обнаружены две дополнительные моды, одна из которых отнесена к линии спектра второго порядка, а другая – к резонансной (дополнительной локальной) моде примеси атомов Se. Для подтверждения отнесения к резонансной моде проведен расчет

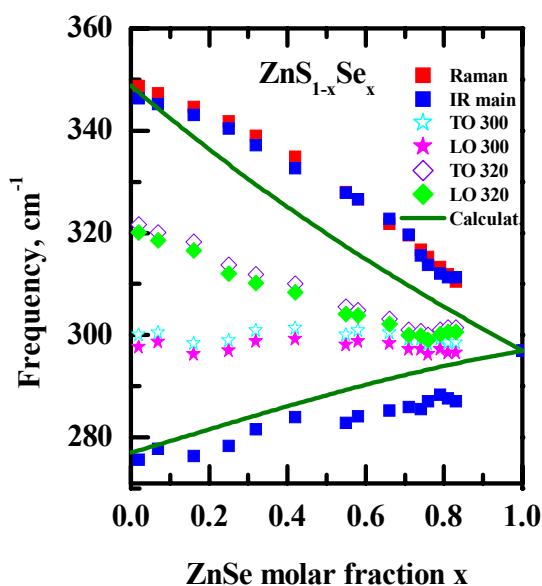


Рис. 4. Дисперсия основных и дополнительных мод в областях частот ZnS-подобных TO- и LO-мод в кристаллах $\text{ZnS}_{1-x}\text{Se}_x$. Сплошные кривые – расчет в приближении модели изосмещений.

спектра колебаний примеси Se в ZnS в приближении микроскопической теории динамики кристаллической решетки с малой концентрацией примеси.

Установлено, что силы осцилляторов основных ZnS- и ZnSe-подобных мод не следуют линейной зависимости и наибольшие отклонения наблюдаются вблизи $x \approx 0$ и $x \approx 1$ [51].

Из экспериментальных спектров ИК отражения системы твердых растворов $\text{Zn}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Se}$ были восстановлены комплексные диэлектрические проницаемости смешанных кристаллов и получены значения микроскопических констант кристаллов, в том числе, микроскопические эффективные динамические заряды ионов, а также получены зависимости частот и сил осцилляторов оптических фононов от состава твердого раствора. Выполнены теоретические расчеты динамики решетки указанных твердых растворов в рамках существующих микроскопических моделей и в итоге получены сведения о природе возникновения дополнительных инвертированных фононов [52, 53].

Экспериментально и теоретически исследованы поляризационные спектры ИК отражения монокристаллов LiYF_4 с различными концентрациями изотопов Li. Обнаружено, что случайное распределение изотопов Li приводит к уширению и сдвигу частот оптических фононов монокристаллов ${}^7\text{Li}_{1-x}{}^6\text{Li}_x\text{YF}_4$, сопоставимое с ангармоническими. Теоретический расчет изотопического и ангармонического сдвига и уширения в спектрах оптических фононов хорошо согласуется с экспериментальными данными [54].

Методами инфракрасного отражения и пропускания в инфракрасной области спектра исследованы оптические свойства квазикристаллических пленок систем Al-Cu-Fe и Al-Pd-Re, а также кристаллических пленок, близких к ним по составу. Исследовались пленки толщиной 0,1-0,3 мкм на сапфировых подложках. Из экспериментальных данных восстановлена комплексная диэлектрическая проницаемость пленок. Обнаружено, что для квазикристаллических пленок она положительна и слабо зависит от частоты за исключением области частот вблизи пика 245 см^{-1} , связанного с возбуждением оптических фононов. Для кристаллических пленок действительная часть диэлектрической проницаемости отрицательна (пленки – металлические), и в спектрах отсутствуют оптические фононы [55,56].

В лаборатории проводились исследования спектров ИК- пропускания и отражения ансамбля квантовых точек (КТ) CdTe, CdSe и наночастиц ядро/оболочка CdTe/CdSe, синтезированных в коллоидном растворе олеиновой кислоты. Определены значения частот колебательных мод в КТ. Сравнение экспериментальных частот колебаний однослойных КТ с теоретически рассчитанными для изолированных КТ позволило сделать вывод о значительном колебательном взаимодействии между такими КТ. По сдвигам частот, обусловленных этим взаимодействием, оценены зазоры между КТ. Частоты колебательных мод двухслойных КТ рассчитаны с учетом их зависимости от отношения радиусов слоев [57].

Исследованы также спектры ИК- отражения структур CdTe/ZnTe, выращенных на буферных слоях ZnTe и CdTe/ZnTe, с квантовыми точками CdTe. Выявлены характерные особенности спектров квантовых точек CdTe: частота моды, близкая к фрелиховской частоте, и повышенное затухание, что позволяет отличить их от спектров плоских слоев того же материала. В спектрах исследованных структур обнаружены особенности, связанные с локальными модами атомов Zn в CdTe и целевыми модами Cd в ZnTe, что свидетельствует о заметной роли процессов диффузии при росте структур [58]. В целом, продемонстрированы значительные возможности методов ИК спектроскопии для исследования структур с квантовыми точками. Полученная информация полезна как для дальнейших фундаментальных исследований квантовых точек, так и для отработки технологии их выращивания.

Продолжались эксперименты на лазере на свободных электронах FELIX. Исследована дисперсия нелинейной (квадратичной) восприимчивости GaAs в области $130\text{--}200\text{ см}^{-1}$, обусловленная резонансом с оптическим фононом. Наблюдалось резонансное усиление генерации второй гармоники на частоте, равной половине частоты фонона и минимум генерации на частоте, лежащей между этой частотой и частотой фонона [59].

Исследовались оптические свойства слоистых структур на основе пористого кремния (ПК). Показано, что такие структуры можно использовать для детектирования малых примесей в воздухе. Так даже одиночный слой ПК позволяет обнаружить пары уротропина (гексаметилентетрамина) в воздухе при концентрации 10^{-7} М. Использование многослойной структуры (одномерного фотонного кристалла) позволяет повысить чувствительность еще на два порядка [60].

Получено значительное (на порядок) усиление сигнала КРС в одномерном фотонном кристалле на основе ПК (структура типа интерферометра Фабри-Перо с внешним серебряным зеркалом) при резонансе возбуждающей лазерной линии с модой фотонного кристалла. Показано, что сигнал генерации суммарных частот SiH_x ($2000\text{--}2300\text{ см}^{-1}$) в ПК возрастает при увеличении пористости (в отличие от ИК поглощения). Генерация суммарных частот в ПК также значительно усиливается при использовании фотонного кристалла [61].

Методом отражательно-абсорбционной ИК спектроскопии исследованы спектры биомолекул на нитиноле с промежуточными слоями нитрида и оксида титана. Показано, что покрытие защитного слоя нитрида титана оксидом улучшает адсорбцию биомолекул.

Исследованы ИК и КРС спектры тонких пленок нитрида, оксида и оксинитрида кремния на кремнии и стали, а также окиси алюминия на алюминии. Из ИК спектров получены толщины ($200\text{--}4100\text{ нм}$), диэлектрические проницаемости пленок и частоты колебательных мод. Построены кривые дисперсии колебательных и интерференционных поляритонов пленок.

Исследована структура и динамика кристаллической решетки сегнетоэлектриков при разных температурах и облучениях сильноточным импульсным электронным пучком различными дозами и энергиями. На основе полученных структурных, ИК и КРС спектроскопических данных проведено моделирование динамики кристаллической решетки, получена информация о локальных структурных изменениях материала, поведении полярных нанодоменных областей на поверхности и по глубине образца [62–66].

Сотрудниками разработан новый метод интерферометрии поверхностных плазмонов (ПП) на границе раздела «металл – жидкость», позволяющий исключить влияние изменений показателя преломления жидкости на регистрируемую интерференционную картину, но при этом сохранить высокую чувствительность ПП к состоянию поверхности. Этот метод был реализован в экспериментах по изучению изменений волнового вектора ПП, происходящих при осаждении монослоя тиола из жидкости на поверхность золота в реальном времени. Теоретическое и экспериментальное описание метода опубликовано в [67]. На данный метод получен патент [68].

Впервые теоретически и экспериментально исследованы плазмон-поляритоны тонких металлических пленок на поверхности одномерного фотонного кристалла. Продемонстрировано, что в такой системе плазмон-поляритоны могут пробегать расстояние в несколько миллиметров. Эта длина пробега на два порядка больше чем в стандартной геометрии Кречманна (при оптимальной толщине пленки и при той же длине волны света). Обнаружено, что при таком увеличении длины пробега поверхностных плазмон-поляритонов в конфигурации

Кречманна возникает интерференция вблизи плазмонного резонанса. На рис.5 показан вид угловой зависимости резонанса при изменении длины пробега поверхностных плазмон-поляритонов, быстро растущей в такой системе с увеличением длины волны излучения. Плазмон-поляритоны с большой длиной пробега на границе с произвольной средой могут быть использованы для создания нового типа биосенсоров и других приложений [69].

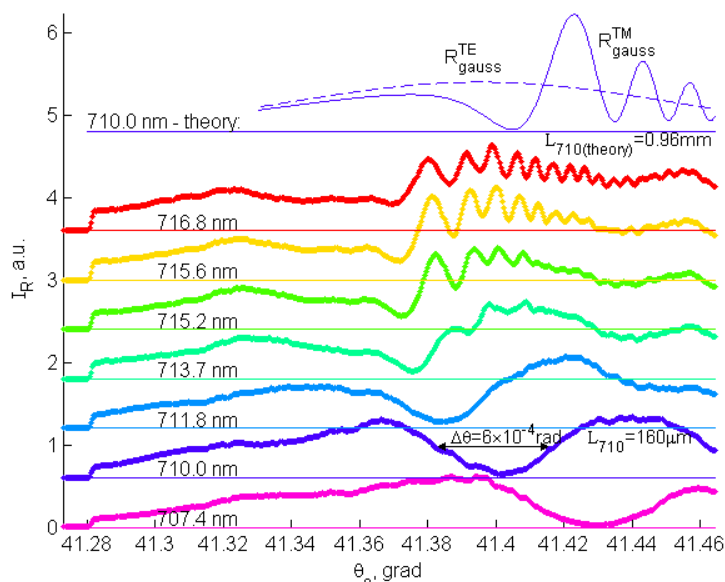


Рис.5. Угловая зависимость резонанса при различных длинах волн. Каждая кривая сдвинута вверх на 0.6 а.е. от предыдущей для лучшей видимости. Диодная линейка была затенена при $\theta \leq 41.28^\circ$, чтобы показать нулевой уровень интенсивности. Интерференция вблизи плазмонного резонанса при $\lambda > 714$ нм – это новая характерная черта сверхдлиннопробежных поверхностных плазмон-поляритонов в конфигурации Кречманна.

Разработан новый оптический биосенсор, основанный на одновременной регистрации двух s-поляризованных волн на поверхности фотонного кристалла с различной глубиной проникновения в исследуемую среду. Это позволило разделить объемный и поверхностный вклады сенсора, а увеличение длины распространения поверхностной волны – повысить чувствительность биосенсора [70].

Разработана методика применения двухканального фурье-спектрометра ближнего и среднего спектрального диапазона для количественного анализа компонентов молочных продуктов а также для идентификации фармакологических препаратов [71].

Методами спектрометрии в ближней инфракрасной области, множественного регрессионного анализа и лазерной корреляционной спектрометрии исследовано влияние размера частиц дисперсной фазы дисперсных систем на калибровочные модели для многокомпонентного количественного анализа сильно рассеивающих органических смесей: белок (мицеллированный казеин и глобулин) в молоке; обращенных мицеллах ПАВ, системах бензин-спирт-вода.

Наряду с фундаментальными исследованиями в лаборатории постоянно проводятся работы по развитию методов спектроскопии. В настоящее время успешно проходит испытания фурье-спектрометр на видимую и ИК области спектра, разработанный и изготовленный в лаборатории, который планируется использовать для изучения спектров многослойных тонкопленочных структур и новых кристаллических материалов.

Литература

1. E.A.Vinogradov, G.N.Zhizhin, M.A.Moskaleva, V.A.Yakovlev. Application of surface polaritons for vibrational spectroscopic studies of and very thin films. *Applied Spectroscopy Reviews*, 18, N 2, 171-262 (1982-83).
2. Е.А.Виноградов, Г.Н.Жижин. Термостимулированное излучение поверхностными колебаниями атомов кристаллической решетки селенида цинка. *Письма в ЖЭТФ*, 24, N 2, 84-86 (1976).
3. Е.А.Виноградов, Г.Н.Жижин, И.И.Хаммадов, В.А.Яковлев. Термостимулированное излучение поверхностных поляритонов молибдата гадолиния в окрестности фазового перехода. *ФТТ*, 23, N 2, 580-581 (1981).
4. E.A.Vinogradov. "Vibrational Polaritons in Semiconductor Films on Metal Surfaces". *Physics Reports*, 217, No.4, p. 159-223, 1992.
5. E.A.Vinogradov, G.N.Zhizhin, V.I.Yudson. "Thermally Stimulated Emission of Surface Polaritons" in "Surface Polaritons: Electromagnetic Wave at Surfaces and Interfaces". "North-Holland", Amsterdam. Ed. by V.M.Agranovich and D.L.Mills, pp. 145-184, 1982; (Поверхностные поляритоны, "Мир", Москва, стр.105-131, 1985).
6. Е.А.Виноградов. Поляритоны полупроводниковой микрополости. *УФН*, 172 (12), с. 1371-1410, 2002.
7. Е.А.Виноградов, И.И.Хаммадов. "Спектроскопия объемных и поверхностных фононов кристаллов". Издательство "ФАН", Ташкент, 166 с., 1989.
8. Н.И.Агладзе, Б.П.Антонюк, В.М.Бурлаков, Е.А.Виноградов, Г.Н.Жижин. "Структурный фазовый переход в приповерхностном слое". *ФТТ*, 23, с.3289-3298, 1981.
9. Антонюк, Б.П., "Поверхностные фононы и структурный фазовый переход в приповерхностном слое", *ФТТ* **20** 2293 (1978).
10. В.М.Бурлаков, Е.А.Виноградов, Ш.Нуров, Н.М.Гасанлы. "Параметры полос колебательного спектра TlInS_2 в области температур фазовых переходов". *ФТТ*, 27, No.11, с.3365-3368, 1985. *Soviet Physics Solid State*, 27, p.2025-2027, 1985.
11. А.А.Аникьев, В.М.Бурлаков, М.Р.Яхьяев. "Аномальное поведение формы фононных линий КР в слоистых сегнетоэлектриках". *ФТТ*, 32, No.7, с.2131-2133, 1990. *Soviet Physics Solid State*, 32, p.1237-1238, 1990.
12. V.M.Burlakov, E.A.Vinogradov. Investigations of phase transition dynamics in layered crystals by means of vibrational spectroscopy. *Ferroelectrics*, vol. 175, p. 51 – 64, 1996.
13. V.M.Burlakov, M.A.Moskalenko."About properties of IR active lattice vibrations in the vicinity of kinks in the Frenkel-Kontorova model". *Pizma v ZHETF*, 65, iss.10, p.750-754 (1997).
14. V.M.Burlakov, M.A.Moskalenko, D.Berner, H.P.Geserich, A.Zibold, D.B.Tanner and F.Levy. "Vibrational properties of the CDW condensate in the quasi-one dimensional conductor $(\text{TaSe}_4)_2\text{I}$: Numerical and experimental study. *J.Physics B*, 244/1-4, 96-102 (1998).
15. V.M.Burlakov, S.A.Darmanyan, V.N.Pyrkov. "Modulation instability of running waves in anharmonic lattices". *JETP*, 81(3), 496-501 (1995) in russian; (*Zh.Eksp.Teor.Fiz.* 108, 904-913).
16. Burlakov V.M., Darmanyan S.A., Pyrkov V.N. "Modulation instability and recurrence phenomena in anharmonic lattices". *Phys.Rev. B* 54, 3257-3265 (1996).
17. Burlakov V.M. "Interference of mode instabilities and pattern formation in anharmonic lattices". *Phys.Rev.Lett.* **80**, 3988 (1998).
18. E.A.Vinogradov, V.N.Denisov, A.V.Zayats, B.N.Mavrin, G.I.Makarov, S.R.Oktybrskii, F.A.Pudonin. "Optical Properties of Si/SiO_2 Superlattices". *Proceed. of the Sino-Soviet Seminar on Spectroscopy and Optoelectronics in Semiconductors and*

Related Materials, Shanghai, China 27-31 May, 1990. Ed. by S.C.Shen, J.Chu a.u., "World Scientific", pp. 121-131, 1990.

19. A.V.Zayats, Yu.A.Repeyev, D.N.Nikogosyan, E.A.Vinogradov. "Relative recombination in short-period a -Si/SiO₂ superlattices". Journal of Luminiscence, 52, p.335-343, 1992.

20. A.V.Zayats, Yu.Repeyev, D.N.Nikogosyan, E.A.Vinogradov. "Two Types of Hot Luminiscence in Si/SiO₂ Superlattices". Physics Letters, A155, No.1, p.65-68, 1991.

21. E.A.Vinogradov, F.A.Pudonin, A.V.Zayats Optical spectroscopy of amorphous Si/SiO₂ quantum well structures. Proceedings of The Fifth Russia-Japan Seminar on Semiconductor Surfaces. Vladivostok, September 15-20, 2002 , p. 16-30.

22. E.A.Vinogradov, V.M.Farztdinov, A.L.Dobryakov, S.A.Kovalenko, Yu.E.Lozonev, and Yu.A.Matveets. Femtosecond dynamics of semiconductor microcavity polaritons. Invited lecture on XVI International conference on nonlinear optics (ICONO'98), Moscow, June 29 – July 3, 1998. Proceedings SPIE, vol.3735-11, p.105-112, 1999.

23. E.A.Vinogradov, V.M.Farztdinov, A.L.Dobryakov, S.A.Kovalenko, Yu.E.Lozonev, and Yu.A.Matveets. Ultrafast Dynamics and Parametric Excitations of Microcavity Modes. Laser Physics, v.8 (3), p.620-624, 1998.

24. E.A.Виноградов, А.Л.Добряков, С.А.Коваленко, Ю.Е.Лозовик, Ю.А.Матвеец, В.М.Фарзтдинов. Фемтосекундная динамика поляритонов полупроводниковой (A₂B₆) микрополости. Известия Академии наук, серия физическая, т.63, № 6, стр. 1058-1068, 1999.

25. E.A.Vinogradov, A.L.Dobryakov, Yu.E.Lozonev, Yu.A.Matveets. "Femtosecond Photoresponse of Structures with the Schottky barrier". Laser Physics, v.11, No.11, 1147-1152, 2001.

26. Konopsky V.N., Saunin S.A., Bykov V.A., Vinogradov E.A. Scanning plasmon near-field microscopy: signal-noise ratio of different registration schemes and prospects for single molecule detection. Physical Chemistry Chemical Physics, V.4, 2733-2737, 2002.

27. Konopsky V.N. "Operation of scanning plasmon near-field microscope with gold and silver tips in tapping mode: demonstration of subtip resolution." Optics Communications, V.185, 83-93, 2000.

28. Konopsky V.N., Kouyanov K.E., Novikova N.N. "Investigations of the interference of surface plasmons on rough silver surface by scanning plasmon near-field microscope." Ultramicroscopy, V.88, 127-138, 2001.

29. G.N.Zhizhin, V.A.Yakovlev. Resonance of transition layer excitations with surface polaritons. In "Surface polaritons. Electromagnetic waves at surfaces and interfaces". North-Holl.Publ.Co, Amsterdam, 1982, ch.7, pp.275-298.

30. G.N.Zhizhin, V.I.Silin, S.A.Voronov, V.A.Yakovlev. IR surface plasmon (polariton) phase spectroscopy. Int.J.Infrar. Millim.Waves (USA), 1989, 10, 101-120.

31. E.V.Alieva, J.E.Petrov, V.A.Yakovlev, Use of surface electromagnetic waves for metal mirrors' reflectivity measurements. Opt.Spectrosc., (1999), 86 (5), pp.828-832.

32. E.V.Alieva, V.A.Yakovlev, V.I.Silin, A.Volkov. Surface electromagnetic wave excitation from infrared to visible. Optics Commun., 1993, 96(4-6), 218-220.

33. G.N.Zhizhin, V.A.Yakovlev. Broad-band spectroscopy of surface electromagnetic waves. Physics Reports, 1990, 194(5-6), 281-289.

34. E.V.Alieva, G.Beitel, L.A.Kuzik, A.A.Sigarev, V.A.Yakovlev, G.N.Zhizhin, A.F.G. van der Meer, M.J. van der Wiel. Linear and nonlinear FEL-SEW spectroscopic characterization of nm thickness films. Appl. Spectr., 1997, 51, 584-591.

35. E.В.Алиева, Г.Н.Жижин, Л.А.Кузик, В.А.Яковлев. Исследование кристаллов в средней и длинноволновой ИК области методом спектроскопии поверхностных электромагнитных волн. ФТТ, 1998,40(2),с.237-241.

36. Е.В.Алиева, Г.Н.Жижин, В.А.Яковлев, В.А.Сычуг, А.Ф.Г.ван дер Меер, М.Дж.ван дер Виль. Генерация второй гармоники при возбуждении встречных поверхностных поляритонов на поверхности кварца. Письма ЖЭТФ, 1995, 62(10), 794-798.
37. Е.В.Алиева, Э.Р.Элиел, Э.В.М.ван дер Хам, А.Ф.Г.ван дер Меер, Ю.Е.Петров, В.А.Сычуг, К.Х.Ф.Врехен, В.А.Яковлев. Гигантское усиление генерации суммарной частоты при возбуждении поверхностного плазмон-поляритона. Письма ЖЭТФ, 66(9), 581-584 (1997).
38. E.W.M.van der Ham, Q.H.F.Vreken, E.R.Eliel, V.A. Yakovlev, E.V.Alieva, L.A.Kuzik, Yu.E.Petrov, V.A. Sychugov, A.F.G. van der Meer. Giant enhancement of sum -frequency yield by surface-plasmon excitation. JOSA B, 1999, v.16, N.7, pp.1146-1152.
39. E.V.Alieva, L.A.Kuzik, V.A.Yakovlev, G.Knippels, A.F.G. van der Meer, G.Mattei. Spectroscopy of a thin fullerene film on silver using sum frequency generation enhanced by visible surface plasmon-polaritons. Chem.Phys.Lett.,1999, v.302, pp.528-532.
40. Л.А.Кузик, Ю.Е.Петров, Ф.А.Пудонин, В.А.Яковлев. Оптические и электрические свойства сверхтонких металлических пленок. ЖЭТФ, 1994, 105(1), 215-223.
41. L.A.Kuzik, V.A.Yakovlev, F.A.Pudonin, G.Mattei. Quantum size effects in the optical conductivity of ultrathin metal films. Surface Science, 1996, 362, 882-885.
42. G.Mattei, A.Marucci, V.A.Yakovlev. Splitting of porous silicon microcavity mode due to the interaction with SiH vibrations. Material Sci. and Eng. B, (1997).
43. G.Mattei, E.V.Alieva, J.E.Petrov, V.A.Yakovlev. Enhancement of adsorbate vibrations due to interaction with microcavity mode in porous silicon superlattice. Surface Sci., 1999, v.427-428, pp.235-238.
44. G. Mattei, V. Valentini, V.A. Yakovlev, An FTIR study of porous silicon layers exposed to humid air with and without pyridine vapors at room temperature. Surf. Sci. (2002) v. 502, p.58.
45. T.V.Dolgova, A.I.Maidikovskii, M.G.Martemyanov, A.A.Fedjanin, O.A.Aktsipetrov, G.Marovsky, V.A.Yakovlev, G.Mattei, N. Ohta, S.Nakabayashi. Giant optical second-harmonic generation in single and coupled microcavities formed from one-dimensional photonic crystals. JOSA (2002) vol 19 (9), pp. 2129-2140.
46. T.V. Dolgova, A. I. Maidikovskii, M. G. Martemyanov, A. A. Fedyanin, O. A. Aktsipetrov, G. Marowsky, V. A. Yakovlev and G.Mattei, Giant microcavity enhancement of second-harmonic generation in all-silicon photonic crystals. Applied Physics Letters (2002) V. 81, p. 2725.
47. V.N. Konopsky, E.V.Alieva. Dispersion relation of surface plasmons near photonic band gaps: influence of the interaction with light. Journal of Modern Optics. 2001, 48 (10), 1597-1615.
48. Е.А.Виноградов, В.О.Компанец, Ю.Е.Лозовик, Ю.А.Матвеев, С.В.Чекалин. Эксперименты по сверхбыстрой спектроскопии оптических мод микрополости на уникальном фемтосекундном спектрометрическом комплексе ИСАН. *Известия Академии наук, серия физическая*, т.72, №5, с. 717-720, 2008.
49. S.V.Chekalin, V.O.Kompanets, Yu.E.Loikov, Yu.A.Matveets, E.A.Vinogradov, Ultrafast photoinduced response at semiconductor microcavity mode frequencies on excitation above and below bandgap. EOS Topical Meeting on Nanophotonics, Metamaterials and Optical Microcavities (TOM 3), 16-19 October 2006, Part of the EOS Annual Meeting 2006, Paris, France, p.128-129.
50. В.А. Аверченко, С.Н. Багаев, В.В. Васильев, Е.А. Виноградов, В.С. Егоров, И.Б. Мехов, А.И. Столяров, И.А. Чехонин. Высокотемпературная Бозе-Эйнштейновская конденсация поляритонов: реализация в условиях

внутрирезонаторной лазерной накачки вещества. "Квантовая электроника" т.36, №6, с. 532-538 (2006).

51. Е.А. Виноградов, Б.Н. Маврин, Н.Н. Новикова, В.А. Яковлев. Дисперсия мод в спектрах оптических фононов смешанных кристаллов $\text{ZnS}_{1-x}\text{Se}_x$. ФТТ, 2006, том 48, вып.10, 1826-1831.

52. L.K.Vodopyanov, E.A.Vinogradov, V.S.Vinogradov, I.V.Kucherenko, B.N.Mavrin, N.N.Novikova and P.V.Shapkin. Optical phonons in $\text{Zn}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Se}$ alloys. Phys.stat.sol.(c),2004, 1, No. 11, 3162-3165.

53. L.K. Vodopyanov, E.A. Vinogradov, V.S. Vinogradov, S.P. Kozyrev, I.V. Kucherenko, B.N. Mavrin, N.N. Novikova, P.V. Shapkin. Optical phonons in $\text{Zn}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Se}$ alloys. Proceed. Intern. Conference "Phonons 2004", S-Petersburg, June, 2004.

54. E.A. Vinogradov, V.A. Yakovlev, N.N. Novikova, M.N. Popova, S.K.Saikin, B.Z. Malkin. Isotopic disorder effect in the infrared reflection spectra of $^6\text{Li}_x^7\text{Li}_{1-x}\text{YF}_4$ single crystals. Solid State Communication, 2007, v. 142, pp. 256-260.

55. V.A.Yakovlev, N.N.Novikova, G.Mattei, A.A.Teplov, D.S.Shaitura, V.G.Nazin, G.V.Laskova, E.D.Olshanskii, D.I.Dolgii. IR reflectance spectra and optical constants of Al-Cu-Fe quasicrystalline thin films. Phys. of Solid State, 2006, 48(5), 821-825. (Fiz. Tverd. Tela, 2006, 48(5), 775-779.)

56. V.A.Yakovlev, N.N. Novikova, G. Mattei, A.A. Teplov, D.C. Shaitura, D.I. Dolgii, and E.Ol'shanskii. Reflection Spectra and Optical Constants of Quasicrystalline Al—Pd—Re Films in the IR Region. Crystallography Reports, 2007, v.52, No.6, pp.1036-1039. (Crystallografiya, 2007, v.52, No. 6, p.1075-1078).

57. R. B. Vasiliev, V. S. Vinogradov, S. G. Dorofeev, S. P. Kozyrev, I. V. Kucherenko and N. N. Novikova. IR-active vibrational modes of CdTe and CdSe colloidal quantum dots and CdTe/CdSe core/shell nanoparticles and coupling effects. Phys. of Solid State, 2007, 49(3), 547-551. (Fiz. Tverd. Tela, 2007, 49(3), 523-526.)

58. I.V. Kucherenko, V.S. Vinogradov, G. Karczewski, N.N. Novikova, M. Cestelli Guidi, and M. Piccinini. Manifestation of CdTe Quantum Dots and Interdiffusion in IR Reflection Spectra of CdTe/ZnTe Structures with Quantum Dots. Physics of the Solid State, 2007, Vol. 49, No. 8, pp. 1563-1566. (Fiz. Tverd. Tela, 2007, 49(8), 1488-1491.)

59. T. Dekorsy, V. A. Yakovlev, W. Seidel, M. Helm, F. Keilmann. Infrared-phonon-polariton resonance of the nonlinear susceptibility in GaAs. Phys. Rev. Lett., 2003, 90(5), pp. (055508-1)-(055508-4).

60. G. Mattei, V. Valentini, V.A. Yakovlev. An FTIR study of hexamethylenetetramine in porous silicon. Physica status solidi (a), 2003, 197(1), pp. 158-162.

61. G.Mattei, V.Valentini, V.A.Yakovlev, A.A.Mani, Y.Sartenaer, P.A.Thiry, A.Peremans, Y.Caudano, L.Dreesen, B.Busson, F.Vidal, C.Humbert, A.Tadjeddine. Sum-frequency generation from surface species in porous silicon. Physica status solidi (a), 2005, 202(8), pp.1487-1491.

62. E.A.Vinogradov, V.V.Efimov, A.V.Kalmykov, B.N.Mavrin, V.F.Minashkin, N.N.Novikova, V.V.Sikolenko, A.V.Skripnik, S.I.Tiutiunnikov, V.A.Yakovlev Optical and structural study of PLZT $x/65/35$ ($x=4.7\%$) ceramics irradiated by high-current pulsed electron beam. Particles and Nuclei Letters, 2002, (1[110]), pp. 39-47.

63. V.V.Efimov, V.V.Ivanov, E.A.Klevtsova, N.N.Novikova, V.V.Sikolenko, S.I.Tiutiunnikov, E.A.Vinogradov, V.A.Yakovlev. Optical constants of the TGS single crystal irradiated by power pulsed electron beam. Particles and Nuclei, Letters, 2002, No 6 (115), 64-71.

64. V.V.Efimov, V.V.Ivanov, A.V.Kalmikov, E.A.Klevtsova, V.F.Manashkin, N.N.Novikova, V.V.Sikolenko, A.V.Skripnik, A.Sternberg, S.I.Tiutiunnikov, V.A.Yakovlev. Structural, Optikal, and Dielectric Investigations of the Relaxor PZLT 9,75/65/35 Ceramics Irradiated by High-Current Pulsed Electron Beam. Ferroelectrics, 2003, vol. 285, pp. 265-274.

65. V.V.Efimov, V.V.Ivanov, E.A.Klevtsova, N.N.Novikova, V.V. Sikolenko, S.I.Tiutiunnikov, V.A.Yakovlev. Optical and structural study of the TGS single crystal irradiated by high-current pulsed electron beam. Izvestiya Akademii Nauk, ser. phys., 2003, v.67, No.8, 1201-1205.

66. V.V.Efimov, S.S.Khasanov, B.N.Mavrin, N.N.Novikova, A.V.Shilnikov, A.I.Burkhanov, V.V.Sikolenko, A.Sternberg, S.I.Tiutiunnikov, D.M.Tobben, V.A.Yakovlev /Structure and lattice dynamics in PLZT 8/65/35 ceramics irradiated by high-current pulsed electron beam. Ferroelectrics, 2004, Vol.302, pp.327-333.

67. E.V.Alieva, V.N.Konopsky. Biosensor based on surface plasmon interferometry independent on variations of liquid's refraction index. Sensors and Actuators, B 99, 2004, pp. 90-97.

68. RU 2 251 681, «Способ регистрации биологических, химических и биохимических процессов на границе жидкость - твердое тело и устройство для его осуществления», Автор(ы): Алиева Е.В. (RU), Конопский В.Н. (RU), Опубликовано: 10.05.2005 Бюл. № 13.

69. V. N. Konopsky, E. V. Alieva. Long-range propagation of plasmon polaritons in a thin metal film on a one-dimensional photonic crystal surface. Physical Review Letters, 2006, V.97, 253904.

70. V. N. Konopsky, E. V. Alieva. Photonic crystal surface waves for optical biosensors. Analytical Chemistry, 2007, V.79, P.4729-4735.

71. А.В.Калинин, В.Н.Крашенинников. Портативный анализатор показателей качества молочных продуктов на основе спектрометрии ближнего ИК диапазона, Журнал прикладной спектроскопии, 2008, т.75, №2, с.274-279.

Сектор Фурье-спектроскопии высокого разрешения



Руководитель сектора
фурье-спектроскопии
высокого разрешения
д.ф.-м.н., проф.
М.Н.Попова

Сектор Фурье-спектроскопии высокого разрешения в составе отдела спектроскопии твердого тела был создан в конце 2005 г. на базе группы фурье-спектроскопии высокого разрешения лаборатории спектроскопии кристаллов (руководитель д.ф.-м.н. проф. М.Н. Попова). В настоящее время в постоянном штате сектора три научных сотрудника, кроме того, работают несколько аспирантов и студентов.

Фурье-спектроскопии в отделе уделялось постоянное внимание, начиная с основания ИСАН 40 лет назад. Разрабатывались теоретические и методические аспекты фурье-спектроскопии. Под научным руководством профессора Г.Н. Жижина в ЦКБ УП РАН были спроектированы и изготовлены фурье-спектрометры различного назначения. Все они проходили испытания и доводку в отделе спектроскопии твердого тела ИСАН. В 1984 г. в ИСАН был установлен уникальный инфракрасный (0.8–50 мкм) вакуумный фурье-спектрометр высокого разрешения (0.005 см^{-1}) УФС-02, спроектированный совместно ИСАН и ЦКБ УП РАН под руководством профессоров Г.Н. Жижина и Е.А. Виноградова и изготовленный в ЦКБ УП РАН. В 1984-85 гг. на фурье-спектрометре были получены первые результаты,

продемонстрировавшие возможности прибора для исследования атомных, молекулярных и твердотельных спектров. Дальнейшая работа развивалась, в основном, в направлении исследований кристаллов с редкоземельными ионами (группа М.Н.Поповой). С 1989 г. эти работы стали проводиться и на фурье-спектрометре канадского производства BOMEM DA3.002 с рабочей областью от далекого ИК диапазона до ультрафиолета и разрешением до 0.0026 см^{-1} . В конце 2006 г. в секторе в специально оборудованном помещении был установлен новый фурье-спектрометр сверхвысокого разрешения IFS-125HR фирмы BRUKER (спектральная область $5 - 50000 \text{ см}^{-1}$, разрешение до 0.001 см^{-1}).

Большой цикл работ посвящен спектроскопии **кристаллов для квантовой электроники**. Остановимся только на немногих работах, которые наиболее интересны по своим физическим результатам. Прежде всего, это работы по спектроскопии кристаллов LiYF_4 , активированных гольмием, эрбием или тулнием. Благодаря отличному оптическому качеству кристаллов, особенностям энергетического спектра и уникальным теплофизическим свойствам LiYF_4 находит самые разнообразные и широкие применения в квантовой электронике, в том числе, для задающих одномодовых генераторов в мощных лазерных установках и линиях оптической связи, для многочастотных лазеров с диапазоном длин волн генерации от инфракрасной до ультрафиолетовой области, для миниатюрных лазеров на концентрированных по редкой земле средах (ионы Ho^{3+} , Er^{3+} и Tm^{3+} , наиболее близкие к Y^{3+} по ионному радиусу, могут входить в кристаллическую решетку в высоких концентрациях, вплоть до стопроцентного замещения иттрия). Кроме того, эти кристаллы, обладающие сравнительно простой кристаллической структурой с единственной позицией для иттрия (или редкой земли) и растущие почти без дефектов, являются уникальными модельными системами для изучения кристаллического поля, электрон-фононного, межионных и, как показали наши исследования, сверхтонких взаимодействий, а также изотопических эффектов.

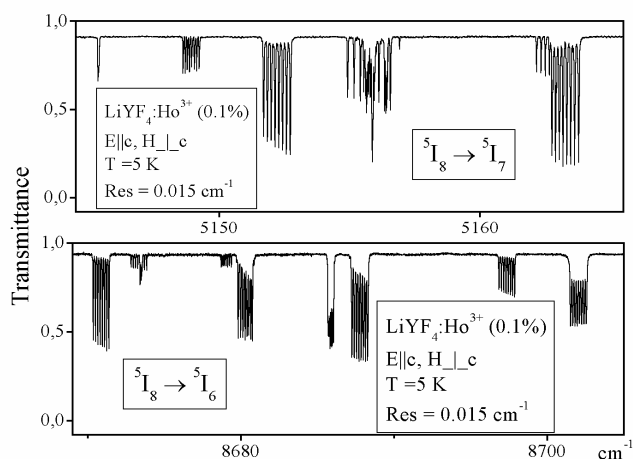


Рис.1. Спектр поглощения иона Ho^{3+} в монокристалле $\text{Li}(\text{Y}_{0.999}\text{Ho}_{0.001})\text{F}_4$.

Нами была обнаружена и исследована **сверхтонкая структура** (СТС) в оптическом спектре $\text{LiYF}_4:\text{Ho}^{3+}$, обусловленная взаимодействием оптических электронов редкоземельного (РЗ) иона с магнитными и электрическими моментами его ядра [1-4]. Примеры спектров со сверхтонкой структурой показаны на рис.1. Это первое наблюдение СТС в инфракрасной области спектра и первое наблюдение СТС сразу в группе мультиплетов в широкой спектральной области, что стало возможным только благодаря применению техники фурье-

спектроскопии высокого разрешения. Впервые отмечены ранее не наблюдавшиеся особенности СТС: СТС с нерегулярными интервалами, сложная группировка линий, оптические переходы, для которых запрет по симметрии снимается сверхтонкими взаимодействиями. На основе теории кристаллического поля были выполнены расчеты сверхтонкой структуры. Хорошее согласие между вычисленной и наблюдаемой СТС позволило объяснить все особенности спектров, а также продемонстрировало хорошее качество вычисленных волновых функций. Результаты по исследованию СТС в спектрах $\text{LiYF}_4:\text{Ho}^{3+}$ можно назвать

классическими. Они уже вошли в учебники и курсы лекций. Так, основоположник применения методов неприводимых тензорных операторов в теории кристаллического поля профессор Б. Вайборн (Brian Wybourne) использовал наши результаты в лекциях и семинарских занятиях со студентами. В последующем СТС была обнаружена и исследована в спектрах кристаллов $\text{LiYF}_4:\text{Er}^{3+}$ [5]

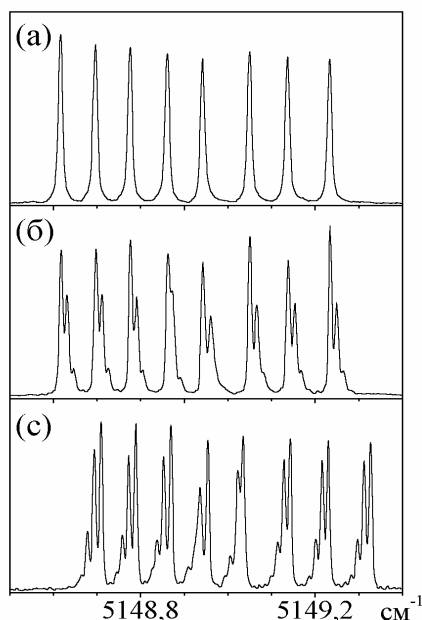


Рис. 2. Спектр поглощения иона $^{165}\text{Ho}^{3+}$ в а) моно-изотопном кристалле $^7\text{LiYF}_4$, б) кристалле с естественным содержанием изотопов лития $^7\text{Li}_{0.93}^6\text{Li}_{0.07}\text{YF}_4$, в) кристалле $^7\text{Li}_{0.1}^6\text{Li}_{0.9}\text{YF}_4$, обогащенном изотопами ^6Li .

$\text{CsCdBr}_3:\text{Pr}^{3+}$ [6], $\text{LiYF}_4:\text{Tm}^{3+}$ [7] и. Отметим, что для крамеровских ионов (с нечетным числом электронов, как у Er^{3+}), СТС спектральных линий носит совершенно иной характер, чем для некрамеровских ионов. В последнее время обсуждается возможность создания квантовых компьютеров и квантовой памяти на основе кристаллов, активированных редкоземельными ионами, с использованием долгоживущих сверхтонких подуровней, что делает упомянутые выше, казалось бы академические исследования, весьма актуальными [7].

Дальнейшие исследования обсуждавшегося выше кристалла $\text{LiYF}_4:\text{Ho}^{3+}$ привели к открытию качественно нового эффекта: зависимости кристаллического поля на редкоземельном ионе от изотопического состава его ближайшего окружения [8, 9]. На рис.2 показана одна из линий СТС в кристаллах $^7\text{Li}_{1-x}^6\text{Li}_x\text{YF}_4:\text{Ho}^{3+}$ (0.1%) с различным изотопическим составом по литию (все остальные элементы, входящие в состав кристалла, моноизотопные). В образцах смешанного состава, содержащих изотопы ^7Li и ^6Li , сверхтонкие компоненты расщепляются на отдельные узкие линии (с полушириной до $0,007\text{ см}^{-1}$). Эта **изотопическая структура** сверхтонких

компонент в большинстве случаев эквидистантна, ее период составляет $0,01\text{--}0,03\text{ см}^{-1}$. Отдельные линии структуры принадлежат центрам с различным изотопическим составом по литию в ближайшем окружении гольмия. Было показано экспериментально и теоретически, что определяющий вклад в изотопические сдвиги дает изменение статического кристаллического поля, вызванное смещением равновесных положений окружающих изотоп ионов из-за ангармонизма нулевых колебаний [9, 10]. В недавней работе [11] исследовалось влияние изотопического беспорядка в литиевой подрешетке на спектры инфракрасного отражения кристаллов LiYF_4 . Теоретическое моделирование показало, что для некоторых колебательных мод вклад изотопического беспорядка в константу затухания сравним с вкладом из-за ангармонизма.

Были выполнены исследования **электрон-фононного взаимодействия** в кристаллах, активированных РЗ ионами. Сравнение экспериментально измеренных (по спектрам высокого разрешения) ширин спектральных линий РЗ ионов с теоретически рассчитанными в рамках модели обменных зарядов для кристаллического поля и электрон-фононного взаимодействия позволило усовершенствовать теорию релаксационных процессов для РЗ ионов в диэлектрических матрицах и получить ряд важных физических результатов [5, 6]. Так, на примере $\text{CsCdBr}_3:\text{Pr}^{3+}$ было показано, что фононная плотность состояний может существенно перераспределяться при активировании редкими землями. Это само по себе приводит к новым особенностям электрон-фононного

взаимодействия, которые необходимо учитывать при описании релаксационных процессов. Кроме того, локальное возрастание упругих сил в активированных кристаллах и соответствующее увеличение корреляций между смещениями РЗ иона и его соседей приводит к сильному подавлению эффективного электрон-фононного взаимодействия [6].

Спектры высокого разрешения позволяют изучать слабые **межионные взаимодействия** редкоземельных ионов. Так, были обнаружены линии парных центров Ho-Ho в спектрах кристаллов $\text{LiMF}_4:\text{Ho}$ ($M=\text{Y}, \text{Lu}$) и было показано, что пара формируется за счет магнитного диполь-дипольного взаимодействия и деформации решетки из-за разницы ионных радиусов ионов Ho^{3+} и M^{3+} [12,13]. Начато исследование парных центров Tm-Tm в кристаллах $\text{LiYF}_4:\text{Tm}$ [7].

Открытие в 1986 г. высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) оживило интерес ученых к смешанным оксидам редкой земли и d -элемента (как, например, медь или никель). Интенсивно исследуются не только сами ВТСП, но и родственные им соединения. Как к модельным для ВТСП системам (в состав которых входят цепочки и (или) плоскости Cu-O), возрос интерес к низкоразмерным магнетикам. Были получены в виде больших монокристаллов хорошего качества различные соединения, содержащие цепочки магнитных d -ионов с полуцелочисленным (Cu^{2+} , $S=1/2$) или целочисленным (Ni^{2+} , $S=1$) спином, или разного рода «лестницы», или плоскости. Это, в частности, открыло возможность изучать фундаментальные квантовые эффекты, как, например, спин-пайерлсовский переход в системе антиферромагнитных гейзенберговских цепочек с полуцелочисленным спином, щель Холдейна для цепочек с целочисленным спином, спиновую щель для спиновых лестниц. Наша группа активно включилась в исследования родственных ВТСП соединений и низкоразмерных магнетиков.

Применение фурье-спектроскопии высокого разрешения, в комбинации с разработанной в группе методикой регистрации спектров порошковых образцов, открыло новые возможности в исследовании (методом редкоземельного спектроскопического зонда) **магнитного упорядочения, магнитных структур, спин-переориентационных переходов, низкоразмерного магнетизма** в магнитных диэлектриках [14]. Рис. 3 иллюстрирует суть метода РЗ спектроскопического зонда в магнитных

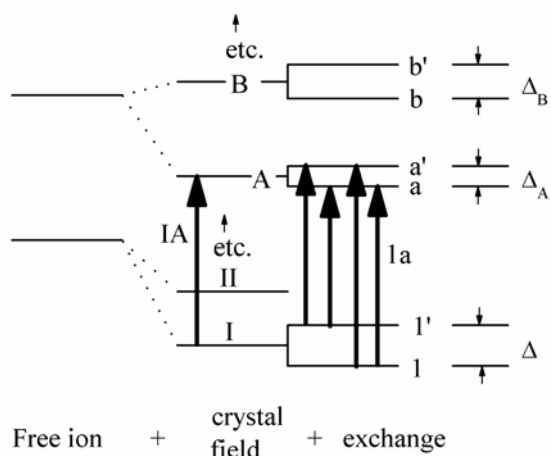


Рис. 3. Уровни крэмпера иона в магнитоупорядоченном кристалле

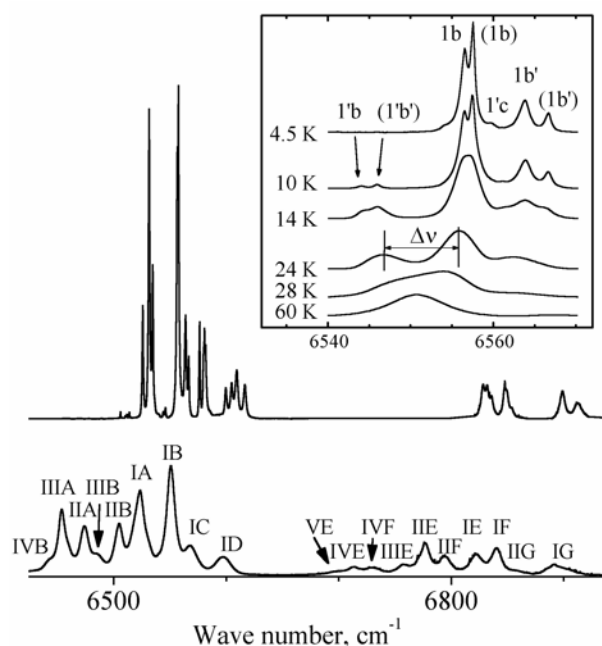


Рис. 4. Поглощение в области оптического перехода $^4I_{15/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ в ионе Er^{3+} в $\text{Er}_2\text{Cu}_2\text{O}_5$ при температуре $88 \text{ K} > T_N$ (нижний спектр) и $6.2 \text{ K} < T_N$ (верхний спектр).

соединениях: регистрируется расщепление спектральных линий, вызываемое обменным расщеплением крамеровских дублетов в магнитно-упорядоченном состоянии. На рис. 4 в качестве примера приведен спектр крамерсова иона Er^{3+} в $\text{Er}_2\text{Cu}_2\text{O}_5$ при температурах как выше так и ниже температуры Нееля $T_N=28\text{ K}$ [15]. Хорошо видно расщепление спектральных линий. Зависимость расщепления от температуры иллюстрирует рис. 5. «Хвост» остаточных расщеплений при $T>T_N$

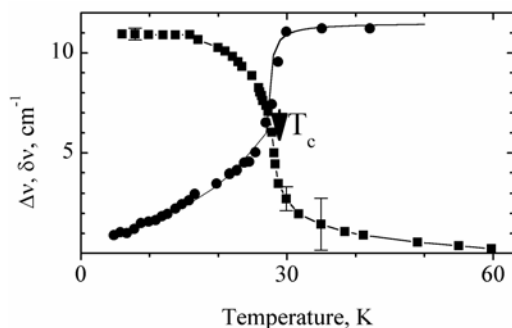


Рис. 5. Температурная зависимость расщепления $\Delta\nu$ (квадратики) и полуширины $\delta\nu$ (кружочки) одной из линий в спектре $\text{Er}_2\text{Cu}_2\text{O}_5$.

обусловлен ближним порядком. Он тем интенсивнее, чем ниже размерность магнитной системы; это обстоятельство позволило изучать низкоразмерные магнитные корреляции. Магнитное упорядочение сопровождается также резким сужением спектральных линий (см. рис. 4, 5). Пример изменения спектра при спин-переориентационном переходе первого рода, когда в узком интервале температур сосуществуют две различные магнитные фазы, показан на рис. 6. Методом РЗ спектроскопического зонда были исследованы соединения, сопутствующие ВТСП типа 1-2-3 ($\text{RBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$): так называемые «голубые» фазы $\text{R}_2\text{Cu}_2\text{O}_5$, «зеленые» и «коричневые» фазы R_2BaCuO_5 , а также цепочечные никелаты R_2BaNiO_5 (здесь R-редкая земля или иттрий). Основные результаты этих исследований, список публикаций и обсуждение методических аспектов можно найти в обзоре [16].

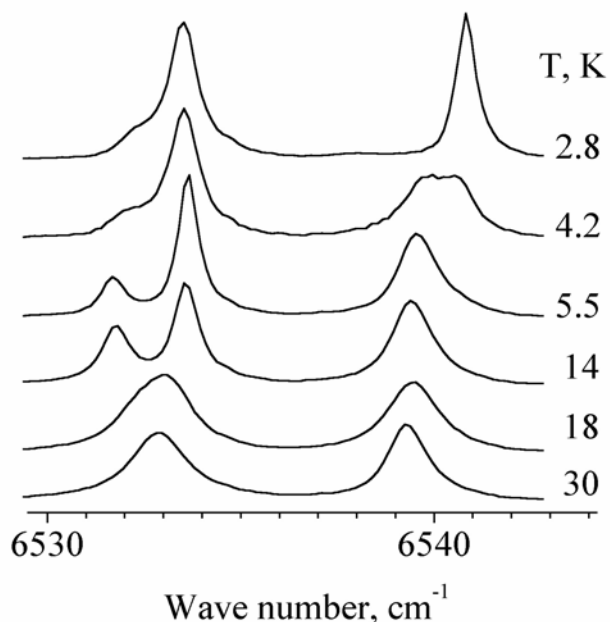


Рис. 6. Линии в области оптического перехода $^4I_{15/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ в ионе Er^{3+} в $\text{Yb}_2\text{BaCuO}_5:\text{Er}$ при различных температурах. $\text{Yb}_2\text{BaCuO}_5$ упорядочивается антиферро-магнитно при $T_N=16.5\text{ K}$. При температуре $T_R=4\text{ K}$ происходит спин-переориентационный переход.

Другое направление в работах сектора по спектроскопии магнитных соединений – это **исследование квантовых эффектов в квазиодномерных магнетиках** с полуцелочисленными и целочисленными значениями спина. Удалось впервые наблюдать появление новых линий в ИК спектре из-за удвоения примитивной кристаллической ячейки («сложенные» моды) при спин-пайерлсовском переходе ($s=1/2$: CuGeO_3 [17]) и зарядово-магнитоэластическом переходе ($s=1/2$, NaV_2O_5 [18]), а также оптические проявления открывания щели в спектре магнитных возбуждений при такого рода переходах [19], рис. 7 (см. также [19]). Наши дальнейшие исследования показали, что в NaV_2O_5 зарядовые, магнитные и

фононные возбуждения сильно взаимодействуют друг с другом [20]. В результате, решетка димеризуется, спины спариваются с образованием немагнитного состояния и заряды упорядочиваются в процессе единого фазового перехода [21].

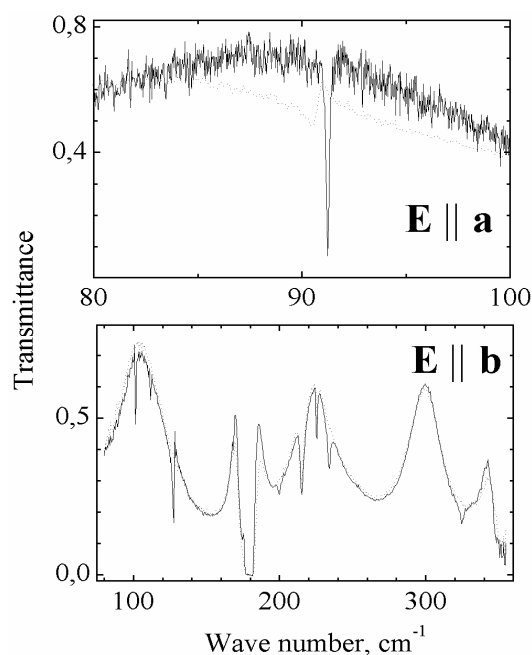


Рис. 7. Поглощение α' - NaV_2O_5 ($T_c=35\text{K}$) при $37\text{K} > T_c$ (пунктирная линия) и при $6\text{K} < T_c$ (сплошная линия). «Сложенные» моды обозначены стрелками. Резонанс Фано ($E||a$) обусловлен взаимодействием фонона с континуумом.

При этом возникает зигзагообразное распределение заряда по «лестнице» [22].

Что касается Холдейновских квазиодномерных магнетиков с целочисленным спином, следует упомянуть исследование систем $(\text{R}_x\text{Y}_{1-x})_2\text{BaNiO}_5$, $\text{R}=\text{Er}, \text{Nd}$ [23, 24]. Спектроскопически мы наблюдаем переход от одномерного квантового (Y_2BaNiO_5) к трехмерному классическому ($\text{Er}_2\text{BaNiO}_5$, $\text{Nd}_2\text{BaNiO}_5$) поведению. По спектроскопическим данным была построена функция намагниченности холдейновской цепочки в зависимости от величины знакопеременного магнитного поля, создаваемого редкоземельной магнитной подсистемой и действующего вдоль направления цепочки [23, 24].

Выполнен ряд исследований **фрустрированных магнетиков**. В частности, исследован структурный фазовый переход в антиферромагнетике с треугольной двумерной решеткой $\text{RbFe}(\text{MoO}_4)_2$ [25]. Исследованы низкоэнергетические возбуждения в РЗ титанатах со структурой пирохлора $\text{R}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$,

что важно для объяснения необычных низкотемпературных свойств этих соединений [26, 27].

Совместно с Белорусским Государственным университетом информатики и радиоэлектроники проводилось исследование фундаментальных основ усиления фотолюминесценции антаноидов в **микропористых ксерогелях, сформированных в мезопористом анодном оксиде алюминия**. Было обнаружено, что оптически активные ионы эрбия в образцах находятся в различном окружении, как кристаллического, так и аморфного типа. Обнаружена сильная люминесценция Er^{3+} в ПАОА как в видимой, так и в инфракрасной области спектра. Показано, что можно изменять цвет видимой люминесценции при изменении длины волны возбуждающего света. Найденные из эксперимента малая скорость фононной релаксации уровней иона Er^{3+} и отсутствие концентрационного тушения являются важными факторами, способствующими усилению люминесценции лантаноидов в данных структурах [28].

С 2004 г. мы проводим исследования новых соединений из семейства РЗ боратов со структурой хантита совместно с несколькими институтами у нас и за рубежом (см. схему на рис. 8). Это очень интересные нелинейные кристаллы, как с точки зрения физики, так и для применений. Они описываются общей формулой $\text{RM}_3(\text{BO}_3)_4$ (R – редкая земля или иттрий; $\text{M} = \text{Al}, \text{Ga}, \text{Cr}, \text{Fe}, \text{Sc}$) имеют тригональную структуру без центра инверсии с изолированными друг от друга R^{3+} ионами, соединяющими изолированные же цепочки MO_6 октаэдров. Алюмобораты $\text{YAl}_3(\text{BO}_3)_4:\text{Nd}$ из этого семейства используется в лазерах с самоудвоением и самосмещением частот и в минилазерах ($\text{NdAl}_3(\text{BO}_3)_4$). Недавно в Институте физики им. Киренского СО РАН в Красноярске в лаборатории Л.Н.Безматерных

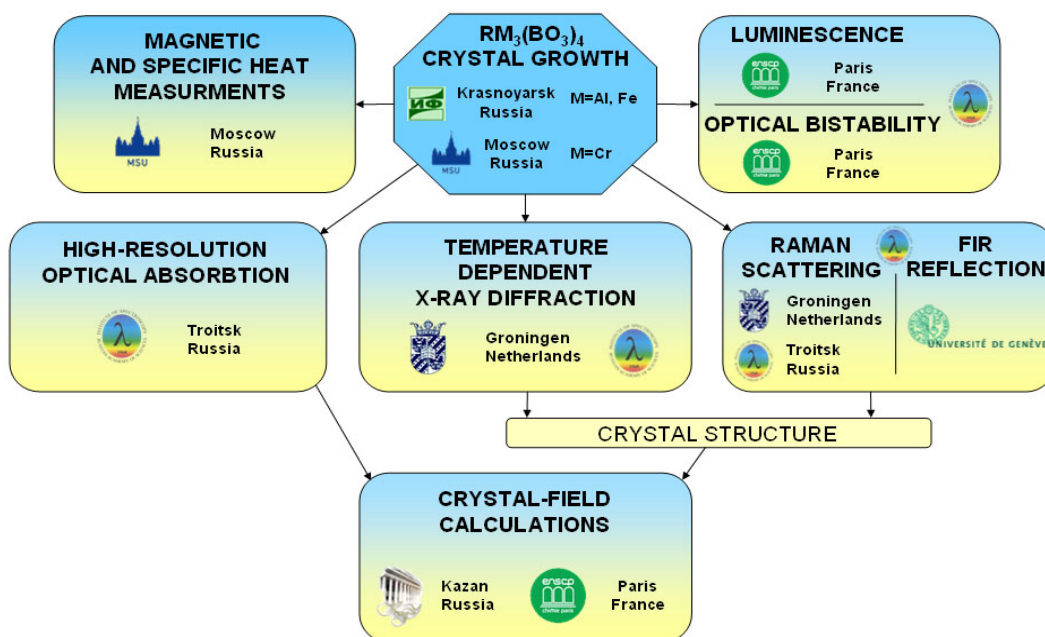


Рис. 8. Схема совместных исследований РЗ боратов $RM_3(BO_3)_4$.

были выращены новые концентрированные кристаллы на основе иттербия $YbAl_3(BO_3)_4$, весьма перспективные для лазерных применений. В настоящее время мы их исследуем, совместно с лабораторией конденсированных сред ИСАН и лабораторией химии конденсированного состояния национального центра научных исследований Франции (CNRS).

В лаборатории Л.Н.Безматерных впервые были получены хорошие большие кристаллы РЗ ферроборатов $RFe_3(BO_3)_4$. Замена немагнитного иона Al^{3+} на магнитный ион Fe^{3+} приводит к новым интересным свойствам. Например, как недавно было обнаружено, $GdFe_3(BO_3)_4$ и $NdFe_3(BO_3)_4$ — **мультиферроики**. Взаимодействия между различными подсистемами в мультиферроиках открывают возможности для создания новых приборов, основанных на взаимном контроле магнитных, электрических и деформационных состояний, поэтому интерес к таким соединениям велик. Мы зарегистрировали спектры комбинационного рассеяния света (КРС) и поглощения новых мультиферроиков - квазиодномерных ферроборатов $RFe_3(BO_3)_4$, $R = Nd, Gd-Er, Y$. По спектрам исследованы структурный и магнитные фазовые переходы [29-33]. Выполнено рентгеноструктурное исследование $GdFe_3(BO_3)_4$ и показано, что ниже температуры структурного фазового перехода соединение является антисегнетоэлектриком [34]. Обнаружены проявления сильного магнитоупругого взаимодействия и спин-спиновых корреляций до $T \sim 10T_N$ [31]. Методом эрбиевого спектроскопического зонда исследованы типы магнитных структур в подсистеме железа для ферроборатов $RFe_3(BO_3)_4$, $R = Nd, Gd-Er, Y$ [32, 35-37]. Мы показали, что реализация того или иного типа магнитной структуры определяется одноионной анизотропией R^{3+} иона. Для этого было проведено экспериментальное и теоретическое исследование кристаллического поля (КП) в ферроборате неодима [33]. Для проверки достоверности полученного набора параметров КП, волновых функций и магнитных g-факторов были промоделированы данные по магнитной восприимчивости $NdFe_3(BO_3)_4$, с учетом магнитной квазиодномерности ферроборатов, и получено хорошее согласие эксперимента и теории [33]. Было исследовано поглощение лазерного света в кристалле $GdFe_3(BO_3)_4:Nd$ при температуре, близкой к температуре спин-

переориентационного фазового перехода, в зависимости от мощности лазера. Обнаружен эффект резкого ступенчатого изменения поглощения света только тех частот, на которых происходит сильное увеличение поглощения при фазовом переходе с ростом температуры. Эффект объяснен нелинейным изменением поглощения и механизмом обратной связи с помощью холодного держателя кристалла [38].

В семействе боратов $RM_3(BO_3)_4$ есть еще одно магнитное подсемейство — хроматов. Мелкие кристаллики хромборатов были выращены на геологическом факультете МГУ в группе Н.И. Леонюка и недавно переданы нам для исследования. По оптическим спектрам обнаружено магнитное упорядочение в $NdCr_3(BO_3)_4$, проведены комплексное исследование свойств этого соединения и сравнение с исследованным ранее изоструктурным ферроборатом $NdFe_3(BO_3)_4$ [39].

По описанной тематике подготовлены и защищены одна докторская и пять кандидатских диссертаций.

Перечисленные направления научной работы Сектора фурье-спектроскопии поддерживались Российскими грантами РФФИ, Президиума РАН, ОФН РАН, Минпромнауки, а также совместными с зарубежными партнерами программами ИНТАС и РАН-НЦНИ (Национальный центр научных исследований Франции CNRS). Все работы выполнялись в тесном сотрудничестве с другими научными коллективами. Среди них: Московский Государственный Университет им. М.В.Ломоносова, Казанский Государственный Университет, Институт физических проблем им. П.Л.Капицы РАН, Институт физики им. Л.В.Киренского СО РАН (г. Красноярск), Институт кристаллографии РАН, Институт радиотехники и электроники РАН, Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Институт общей физики РАН, Московский энергетический институт, Лаборатория химии конденсированного состояния Высшей школы химии Парижа (CNRS-UMR 7475), Лаборатория физической химии твердого тела Парижского Университета (Франция), Университет г. Гронингена (Нидерланды), Университет г. Турку (Финляндия), Институт физики Польской АН (Польша), Институт науки о материалах г. Мадрида (Испания), Мадридский университет (Испания), Университет Кантербери (Новая Зеландия), Институт физики твердого тела Токийского Университета (Япония), Женевский Университет (Швейцария), Белорусский Государственный Университет информатики и радиоэлектроники г. Минск).

Аппаратура сектора фурье-спектроскопии высокого разрешения вместе с другими фурье-спектрометрами отдела спектроскопии твердого тела — ИК фурье-спектрометром IFS 66v (диапазон $50-3500\text{ см}^{-1}$, разрешение до 0.1 см^{-1}) и фурье-спектрометром для КРС с микроскопом (оба прибора — фирмы “Bruker”) используются в секторе фурье-спектроскопии центра коллективного пользования “Опτικο-спектральные исследования” (ЦКП ОСИ) ИСАН (руководитель ЦКП ОСИ — заместитель директора ИСАН д.ф.-м.н. Компанец О.Н., руководитель сектора фурье-спектроскопии ЦКП ОСИ — д.ф.-м.н. Попова М.Н.). В секторе фурье-спектроскопии ЦКП ОСИ выполняются разнообразные исследования для других лабораторий ИСАН и для других российских и зарубежных организаций.

Литература

1. N.I.Agladze, M.N.Popova. Hyperfine structure in optical spectra of $\text{LiYF}_4\text{:Ho}$. *Solid State Commun.*, v. 55, №12, p.1097-1100 (1985).
2. Н.И.Агладзе, Е.А.Виноградов, М.Н.Попова. Проявление квадрупольного сверхтонкого взаимодействия и взаимодействия между уровнями в оптическом спектре кристалла $\text{LiYF}_4\text{:Ho}$. *ЖЭТФ*, т.91, вып.4(10), стр. 1210-1218 (1986).
3. Н.И.Агладзе, Е.А.Виноградов, М.Н.Попова. Эффект заимствования интенсивности в оптическом спектре кристалла $\text{LiYF}_4\text{:Ho}$. *Оптика и спектроскопия* т.61, стр. 3-5 (1986).
4. Marina N. Popova and Nikolay I. Agladze, Hyperfine structure in optical spectra of $\text{LiYF}_4\text{:Ho}^{3+}$: forbidden transitions, *Molecular physics* v. 102, N 11–12, стр. 1377–1380 (2004)
5. M.N.Popova, E.P.Chukalina, B.Z.Malkin, S.K.Saikin. Experimental and theoretical study of the crystal-field levels, hyperfine and electron-phonon interactions in $\text{LiYF}_4\text{:Er}^{3+}$. *Phys. Rev. B* v.61, p. 7421–7427 (2000).
6. M.N.Popova, E.P.Chukalina, B.Z.Malkin, A.I.Iskhakova, E.Antic-Fidancev, P.Porcher, and J.P.Chaminade. High resolution infrared absorption spectra, crystal-field levels, and relaxation processes in $\text{CsCdBr}_3\text{:Pr}^{3+}$. *Phys. Rev. B* v. 63, p. 075103-1–075103-1 (2001).
7. D.S. Pytalev, S.A. Klimin, M.N.Popova, Spectral signatures of hyperfine and isotopic effects and of $\text{Tm}^{3+}\text{--Tm}^{3+}$ pairs in $\text{LiYF}_4\text{:Tm}$, *Phys. Lett. A* v.372 p.3506–3509 (2008).
8. N.I.Agladze, M.N.Popova. Fine structure of hyperfine components in optical spectra of $\text{LiYF}_4\text{:Ho}$. IInd International Symposium on Rare Earth Spectroscopy, Sept. 9-14, 1989, Changchung, China, Abstracts.
9. N.I.Agladze, M.N.Popova, G.N.Zhizhin, V.I.Egorov, M.A.Petrova. Isotope structure in optical spectra of $\text{LiYF}_4\text{:Ho}^{3+}$. *Phys.Rev.Lett.* v. 66, №4, p. 477-480 (1991).
10. Н.И.Агладзе, М.А.Корейба, Б.З.Малкин, В.Р.Пекуровский, М.Н.Попова. Изотопические эффекты в структуре решетки, в колебательных и оптических спектрах кристаллов ${}^6\text{Li}_x{}^7\text{Li}_{1-x}\text{YF}_4\text{:Ho}^{3+}$. *ЖЭТФ*, т.104, вып.6(12), стр. 4171-4193 (1993).
11. A.V. Vinogradov, V.A. Yakovlev, N.N. Novikova, M.N. Popova, S.K. Saikin, B.Z. Malkin. Isotopic disorder effect in the infrared reflection spectra of ${}^6\text{Li}_x{}^7\text{Li}_{1-x}\text{YF}_4$ single crystals, *Solid State Comm.* т. 142, стр. 256-260, (2007).
12. D.S. Pytalev, S.A. Klimin, M.N.Popova, High-resolution optical study of $\text{Ho}^{3+}\text{--Ho}^{3+}$ pairs in $\text{LiY}_{1-x}\text{Ho}_x\text{F}_4$ crystals, *Phys. Lett. A* 372 (2008) 2332.
13. Д.С. Пыталев, С.А. Климин, М.Н. Попова, Линии парных центров $\text{Ho}^{3+}\text{--Ho}^{3+}$ в оптических спектрах кристаллов LiYF_4 и LiLuF_4 , *ФТТ*, т.50, вып.9, стр.1589-1592 (2008).
14. M.N. Popova, High-resolution Fourier Transform Spectroscopy: Application to Magnetic Insulator, in: *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, p. 3786-3790, Elsevier, 2001
15. G.G.Chepurco, I.V.Paukov, M.N.Popova, Ja.Zoubkova. Spectral studies of magnetic cuprates $\text{R}_2\text{Cu}_2\text{O}_5$. *Sol.State Commun.*, V. 79, №7, P. 569-572 (1991).
16. M.N.Popova. High-resolution spectroscopy of rare earth cuprates and nickelates. *Journ. of Alloys and Compounds* v. 275–277, p. 142–147 (1998).
17. M.N.Popova, A.B.Sushkov, S.A.Golubchik, A.N.Vasil'ev and L.I.Leonyuk. Folded modes in the infrared spectra of the spin-Peierls phase of CuGeO_3 . *Phys.Rev.B* v. 57, p. 5040 (1998).
18. М.Н.Попова, А.Б.Сушков, А.Н.Васильев, М.Исобоэ, Ю.Уэда. Появление новых линий и изменение формы линий в ИК спектре монокристалла NaV_2O_5 при спин-пайерлсовском переходе. *Письма в ЖЭТФ*, т. 65, вып.9, стр. 711-716 (1997).

19. М.Н.Попова. Инфракрасная спектроскопия новых спин-пайерлсовских соединений. УФН, т. 169, №3, стр. 353-355 (1999).
20. M.N.Popova, A.B.Sushkov, S.A.Klimin, E.P.Chukalina, B.Z.Malkin, M.Isobe, Yu.Ueda. Lattice vibrations of α' - NaV_2O_5 in the low-temperature phase: An alternative interpretation to magnetic bound states. Phys. Rev. B v.65, p. 144303-1–144303-14 (2002).
21. М.Н.Попова, А.Б.Сушков, Е.П.Чукалина, Е.А.Романов, М.Изобэ, Ю.Уэда. Зарядовое упорядочение и димеризация решетки в α' - NaV_2O_5 . Один или два фазовых перехода? Физика твердого тела т. 44, №8, стр. 1390-1394 (2002).
22. A.I.Smirnov, M.N.Popova, A.B.Sushkov, S.A.Golubchik, D.I.Khomskii, M.V.Mostovoy, A.N.Vasil'ev, M.Isobe, and Y.Ueda. High-frequency dielectric and magnetic anomaly at the phase transition in NaV_2O_5 , Phys. Rev. B v.59, p. 14546–14551 (1999).
23. M.N. Popova, S.A. Klimin, E.P. Chukalina, B.Z. Malkin, R.Z. Levitin, B.V. Mill, E. Antic-Fidancev. High-resolution spectral study of Er^{3+} crystal-field levels and magnetic ordering in $(\text{Er}_x\text{Y}_{1-x})_2\text{BaNiO}_5$ chain compounds, Phys.Rev.B v.68, p. 155103 (2003).
24. M.N. Popova, S.A. Klimin, E.P. Chukalina, E.A. Romanov, B.Z. Malkin, E. Antic-Fidancev, B.V. Mill, G. Dhalenne, High-resolution optical spectroscopy investigation of $\text{Nd}_2\text{BaNiO}_5$ and $\text{Nd}_{0.1}\text{Y}_{1.9}\text{BaNiO}_5$ and crystal-field parameters for rare-earth linear-chain nickelates, Phys. Rev. B v.71, p. 024414 (2005).
25. S. A. Klimin, M. N. Popova, B. N. Mavrin, P. H. M. van Loosdrecht, L. E. Svistov, A. I. Smirnov, L. A. Prozorova, H.-A. Krug von Nidda, Z. Seidov, A. Loidl, A. Ya. Shapiro, and L. N. Demianets, Structural phase transition in the two-dimensional triangular lattice antiferromagnet $\text{RbFe}(\text{MoO}_4)_2$, Phys. Rev. B v.68, p.174408-1 - 174408-8 (2003).
26. B. Z. Malkin, A. R. Zakirov, M. N. Popova, S. A. Klimin, E. P. Chukalina, E. Antic-Fidancev, Ph. Goldner, P. Aschehoug, G. Dhalenne, Optical spectroscopy of $\text{Yb}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ and $\text{Y}_2\text{Ti}_2\text{O}_7:\text{Yb}^{3+}$ and crystal-field parameters in rare-earth titanate pyrochlores, Phys. Rev. B v.70 p.075112 (2004).
27. С. А. Климин, М. Н. Попова, Е. П. Чукалина, Б. З. Малкин, А. Р. Закиров, Е. Antic-Fidancev, Ph. Goldner, P. Aschehoug, G. Dhalenne, Штарковские уровни иона Yb^{3+} в $(\text{Yb}_x\text{Y}_{1-x})_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ и кристаллическое поле в РЗ титанатах со структурой пирохлора ФТТ, т. 47, №8, стр. 1425-1430 (2005).
28. N.V.Gaponenko, I.S.Molchan, E.Antic-Fidancev, P.Aschehoug, M.N.Popova, S.A.Klimin, E.P.Chukalina, Absorption and emission of erbium-doped titania xerogels in porous anodic alumina, Phys.Lett.A v.323, p. 159-163 (2004).
29. E. P. Chukalina, D. Yu. Kuritsin, M. N. Popova, L. N. Bezmaternykh, S. A. Kharlamova, V. L. Temerov, Magnetic ordering of $\text{NdFe}_3(\text{BO}_3)_4$ studied by infrared absorption spectroscopy, Phys. Lett. A v.322, p. 239-241 (2004).
30. R.Z. Levitin, E.A. Popova, R.M. Chtsherbov, A.N. Vasiliev, M.N. Popova, E.P. Chukalina, S.A. Klimin, P.H.M. van Loosdrecht, D. Fausti, L.N. Bezmaternykh, Cascade of phase transitions in $\text{GdFe}_3(\text{BO}_3)_4$, Письма в ЖЭТФ, т. 79, №9, стр. 531-534, (2004).
31. D. Fausti, A. Nugroho, P. van Loosdrecht, S.A. Klimin, M.N. Popova, L.N. Bezmaternykh, Raman scattering from phonons and magnons in $\text{RFe}_3(\text{BO}_3)_4$, Phys. Rev. B v.74, p. 024403-1 – 0254403-12 (2006).
32. М.Н. Попова, Е.П. Чукалина, Т.Н. Станиславчук, Л.Н. Безматерных, Спектроскопическое исследование магнитных фазовых переходов и магнитных структур в редкоземельных ферроборатах $\text{RFe}_3(\text{BO}_3)_4$ ($\text{R}=\text{Y}, \text{Er}, \text{Tb}, \text{Gd}$), Известия РАН, серия Физическая, т. 70, № 11, стр.1652-1658 (2006).
33. M.N. Popova, E.P. Chukalina, T.N. Stanislavchuk, B.Z. Malkin, A.R. Zakirov, E. Antic-Fidancev, E.A. Popova, L.N. Bezmaternykh, and V.L. Temerov, Optical

spectra, crystal-field parameters, and magnetic susceptibility of multiferroic $\text{NdFe}_3(\text{BO}_3)_4$, *Phys. Rev. B* v. 75, No 22, p. 224435-1 – 224435-12 (2007).

34. S. Klimin, D. Fausti, A. Meetsma, L. N. Bezmaternykh, P.H.M. van Loosdrecht, T.T.M. Palstra, Evidence for differentiation in the iron-helicoidal chain in $\text{GdFe}_3(\text{BO}_3)_4$, *Acta Cryst. B.* v.61, p. 481 (2005).

35. M.N. Popova, E.P. Chukalina, T.N. Stanislavchuk, and L.N. Bezmaternykh, Different types of magnetic ordering in $\text{RFe}_3(\text{BO}_3)_4$, $\text{R}=\text{Gd}$, Tb , Er and Y , as studied by the method of Er^{3+} spectroscopic probe, *J. Magnetism and Magnetic Materials* v. 300, p.e440-e443 (2006).

36. T.N. Stanislavchuk, E.P. Chukalina, M.N. Popova, L.N. Bezmaternykh, I.A. Gudim, Investigation of the iron borates $\text{DyFe}_3(\text{BO}_3)_4$ and $\text{HoFe}_3(\text{BO}_3)_4$ by the method of Er^{3+} spectroscopic probe, *Physics Letters A* v. 368, p. 408-411 (2007).

37. Е.П. Чукалина, Т.Н. Станиславчук, М.Н. Попова, Л.Н. Безматерных, И.А. Гудим, Магнитные свойства редкоземельных ферроборатов: спектроскопическое исследование методом редкоземельного зонда, *Известия РАН. Серия физическая*, т. 70, N11, стр. 1606-1608 (2007).

38. Ph. Goldner, O. Guillot-Noel, J. Petit, M.N. Popova, L. Bezmaternykh, Light induced absorption switching in $\text{Nd}^{3+}:\text{GdFe}_3(\text{BO}_3)_4$ single crystal. *Phys. Rev. B* v.76, No.16, p. 165102-1 - 165102-6 (2007).

39. E.A. Popova, N.I. Leonyuk, M.N. Popova, E.P. Chukalina, K.N. Boldyrev, N. Tristan, R. Klingeler, B. Buechner, Thermodynamic and optical properties of $\text{NdCr}_3(\text{BO}_3)_4$, *Phys. Rev. B.* v.75, No 5, p. 054446-1 – 054446-8 (2007).

Монографии

1. Х.Е.Стерин, В.Т.Алексанян, Г.Н.Жижин. Каталог спектров КРС углеводородов. М., Наука, 1976, 359 с.; Kh.E.Sterin, V.T.Aleksanyan, G.N.Zhizhin. Raman spectra of hydrocarbons. A Data Handbook. Pergamon Press. Oxford, New York, Toronto, Sydney, Paris, Frankfurt, 1980, 358 pp.

2. Г.Н.Жижин, Б.Н.Маврин, В.Ф.Шабанов. Оптические колебательные спектры кристаллов. М., Наука, 1984, 232 с.

3. Г.Н.Жижин, В.А.Вагин, М.А.Гершун, К.И.Тарасов. Светосильные спектральные приборы. М., Физматгиз, "Наука", 1988, 263 с.

4. Е.А.Виноградов, И.И.Хаммадов. "Спектроскопия объемных и поверхностных фононов кристаллов". Издательство "ФАН", Ташкент, 166 с., 1989.

5. G.N.Zhizhin, E.I.Mukhtarov. "Optical spectra and lattice dynamics of molecular crystals", "Vibrational spectra and structure" series (ed. J.R.Durig), Amsterdam, Elsevier, 1995, vol.21, 447 pp.

6. A.N.Kuptsov, G.N.Zhizhin. "Handbook of Fourier Transform Raman and Infrared Spectra of Polymers", Amsterdam, Elsevier, "Physical Sciences Data" series, 1998, vol.45, 570 pp.

7. Н.В.Сидоров, Т.Р.Волк, Б.Н.Маврин, В.Т.Калинников. Ниобат лития: дефекты, фоторефракция, колебательный спектр, поляритоны. М., Наука, 2003, 255 с.

Отдел лазерно-спектрального приборостроения



Отдел организован в 1979 г. и до 1980 г. именовался отделом оптико-спектральной аппаратуры. Первоначально он задумывался дирекцией Института как зародыш будущего СКБ того же профиля, призванного усилить экспериментальные работы научных лабораторий и способного довести их многочисленные приборные разработки до внедрения в народное хозяйство. Ввиду существовавших в то время больших организационных трудностей, кадровых ограничений и одновременно сомнений в необходимости иметь небольшому академическому институту собственное хозрасчетное СКБ идея трансформировалась в создание в Институте специализированного приборостроительного отдела, основу которого составила новая лаборатория лазерно-спектрального приборостроения (ЛСП), в которую пришли специалисты по оптике и лазерной технике, электронно-вычислительной технике и автоматике, а также конструкторы. Для ускорения и лучшей завершенности цикла конструкторской разработки приборов и их материализации в виде экспериментальных и опытных образцов лаборатория получила поддержку со стороны двух специально организованных участков в опытном производстве (ОП): оптико-механического и участка монтажа и регулировки радиоэлектронной аппаратуры.

Основной задачей отдела ЛСП стало научное оптико-спектральное приборостроение, включающее в себя разработку и создание новых оптико-спектральных и электронно-оптических приборов, устройств и систем, в том числе таких, идеология которых зародилась и в виде лабораторных макетов оформилась в других научных лабораториях Института, создание на базе этих разработок новых и модернизацию имеющихся экспериментальных установок, выпуск малых серий приборов и установок для лабораторий Института и других организаций.

Коллектив отдела ЛСП первоначально составил 16 человек. В настоящее время, после периода роста (до 1992 года) и последующих в 1992-98 гг. сокращений и упорядочения численности, отдел ЛСП насчитывает те же 16 человек, включая 4 специалистов ОП. Первыми сотрудниками отдела были к.т.н.Е.Л.Михайлов, И.Н.Нестерук и В.М.Гусев. Первым заведующим с момента организации отдела и по настоящее время является д.ф.-м.н. О.Н.Компанец, работавший в 1979 г. старшим научным сотрудником, руководителем группы в лаборатории лазерной спектроскопии (рук. профессор В.С.Летохов).

Первые разработки отдела ЛСП связаны с созданием, совместно с отделом лазерной спектроскопии (группа к.ф.-м.н. В.И.Мишина), двух автоматизированных лазерных спектрометров для экспериментов по лазерной фотоионизационной спектроскопии атомов со стабильными (ИСАН) и короткоживущими ядрами (ЛИЯФАН), а также с созданием, совместно с отделом молекулярной спектроскопии (группа д.ф.-м.н. М.А.Большова), экспериментального образца автоматизированного лазерного атомно-флуоресцентного аналитического спектрометра, переданного в рамках хозяйственного договора в ГИРЕДМЕТ в 1984 г. В рамках этих работ были разработаны импульсные перестраиваемые лазеры на красителях с узкой линией излучения, устройства для измерения их длины волны

и выходной мощности, фоторегистрирующие системы, различные оптико-механические узлы (оптический конструктор).

В дальнейшем разработка лазерных исследовательских и аналитических спектрометров стала одним из главных направлений работы отдела. Для поддержания этих работ в 1985 г. при Институте был организован конструкторский отдел (КО) ЦКБ уникального приборостроения АН СССР, который возглавил к.т.н. Е.Л.Михайлов. Отдел просуществовал до 1990 г.. В результате совместной работы отдела ЛСП ИСАН и КО ЦКБ УП, при научном руководстве со стороны отделов молекулярной спектроскопии (группа д.ф.-м.н. М.А.Большова) и лазерной спектроскопии (группа к.ф.-м.н. Г.И.Бекова), были разработаны и изготовлены опытные образцы автоматизированных лазерных аналитических спектрометров (атомно-флуоресцентный - 1987 г. и атомно-фотоионизационный - 1989 г.) для ультрачувствительного определения следовых содержаний и микропримесей элементов в различных объектах с пределами обнаружения элементов (более 60) на уровне 10^{-10} и ниже весовых процентов. Всего отделом ЛСП, КО и ОП совместно с отделами молекулярной и лазерной спектроскопии было изготовлено 10 подобных аналитических спектрометров, используемых в ИСАН и других организациях (в том числе за рубежом – в Финляндии, Ю.Корее, КНР) для научных исследований, контроля технологии получения высокочистых веществ, определения следов элементов в природных образцах, для контроля загрязнений окружающей среды.



Рис. 1. Комплекс перестраиваемых лазеров для лазерной резонансной фотоионизации атомов.

Следующей серьезной разработкой отдела явилось создание автоматизированного комплекса селективного лазерного ионного источника RILIS на основе импульсных перестраиваемых лазеров на красителях с накачкой лазерами на парах меди, предназначенного для селективной фотоионизации и высокочувствительной детекции редких изотопов с короткоживущими ядрами в режиме “on-line” на выходе ускорителя и масс-сепаратора частиц (научный руководитель – к.ф.-м.н. В.И.Мишин). Первый подобный комплекс успешно работает в течение многих лет в составе масс-сепараторного комплекса ISOLDE на протонном бустерном ускорителе в ЦЕРН (Швейцария), с его помощью получены ионные пучки 20 элементов периодической системы для решения многих задач ядерной физики, астрофизики, физики твердого тела, медицинских приложений. Благодаря своим уникальным свойствам RILIS стал наиболее востребованным типом ионного источника комплекса ISOLDE, а также привлек внимание специалистов по ядерной физике и материаловедению из других стран, сделавших заказы на изготовление такого же лазерного ионного источника. Второй комплекс был поставлен по контракту в 1999 г. в Северо-западный институт ядерной технологии КНР (рис.1). По другому контракту (2003-2007 гг.) отдел участвовал в разработке для СИЯТ (КНР) атомизаторов для лазерного фотоионизационного аналитического спектрометра (В.М.Гусев, М.А.Павлов).

В последние 10 лет из-за ухода из отдела нескольких основных сотрудников усилия коллектива сместились в направлении создания малогабаритных аналитических спектральных приборов, использующих различные принципы и

отличающихся объектами исследования, спектральным диапазоном, чувствительностью, степенью сложности, масштабом использования.

В частности, в отделе проводится разработка комплекса разнообразных портативных дихрометров для целей биохимии и медицины с использованием биодатчиков на основе жидкокристаллических дисперсий ДНК, разработанных в Институте молекулярной биологии им. В.А.Энгельгардта РАН (лаборатория проф. Ю.М.Евдокимова), с характерным для них свойством аномальной оптической активности. Измеряя при помощи портативного дихрометра изменения аномального кругового дихроизма при взаимодействии жидкокристаллического биодатчика с биологически активным соединением (БАС), можно с высокой чувствительностью и за короткое время (минуты) определять наличие и концентрацию в физиологической жидкости (кровь и др.) различных генотоксикантов, антибиотиков и других лекарственных препаратов, тяжелых металлов, общего белка и т.д.

Отдел приступил также к созданию новых модификаций эмиссионного спектрометра для многоэлементного анализа редкометаллических руд, объектов окружающей среды, судебной экспертизы и др. Разрабатываются как малогабаритные спектрометры с автоматическим управлением дифракционной решеткой и многоканальной системой регистрации на охлаждаемых линейных ПЗС, так и методики эмиссионного анализа геологических образцов и металлических матриц с использованием разных источников возбуждения спектров. Продолжаются работы по созданию быстродействующих систем перестройки и установки длины волны для спектральных приборов.

Другим направлением работ отдела ЛСП остается квалифицированная поддержка специалистами отдела приборных разработок и работ по модернизации и автоматизации экспериментальных установок в исследовательских лабораториях Института.

Коротко перечислим основные результаты разработок отдела по всем указанным направлениям, выделяя работы, выполненные за последние пять лет:

— Создана серия перестраиваемых импульсных лазеров на красителях с автоматическим (в т.ч. микропроцессорным) управлением длиной волны с накачкой излучением азотного, медного, эксимерного и твердотельных лазеров с узкой (в т.ч. перестраиваемой по ширине) линией излучения (25-3 пм). Изготовлено около 50 таких лазеров, более половины которых используется за пределами Института, в том числе в экспериментах в ЦЕРН (Швейцария), НИСТ (США), КИИАЭ (Ю.Корея), СЗИЯТ (КНР) и др. научных центрах. Авторы разработок: к.ф.-м.н. В.М.Апатин, В.М.Гусев, к.ф.-м.н. В.И.Мишин, М.А.Павлов, В.С.Шишковский. В настоящее время работы по этому направлению не ведутся.

— Разработана гамма оригинальных электромеханических устройств (гальванометрических сканаторов-позиционеров) для быстрого (10-1000 мс) прецизионного (0,2-10") углового (до 360°) перемещения оптических элементов (зеркал, дифракционных решеток и пр.), используемых для точной и скоростной автоматической перестройки длины волны лазеров и монохроматоров, поворота нелинейных кристаллов, управления лазерным лучом в задачах передачи оптической информации, медицины, маркировки, резки, микрообработки материалов, в следящих системах и т.д.. За последние годы накоплен большой опыт по разработке различных алгоритмов управления электромеханическими системами сканирования оптических приборов, а также моментных двигателей различного типа, измерительных преобразователей, их компоновки и оптимизации всех узлов систем сканирования. Данный опыт позволяет создавать системы

Авторы разработок: Иг.Н.Нестерук (руководитель работ), Ир.Н.Нестерук, В.В.Колосов, В.А.Пакутнев, А.С.Станкевич. Изготовлено более 50 таких устройств для лазеров, монохроматоров, для управления положением светового луча и других целей.



6

6

Под руководством к.т.н. Э.Г.Силькиса разработаны также специализированные образцы фотоэлектронных регистрирующих кассет (ФЭК), содержащие несколько ЛПЗС, для оснащения ими эмиссионных спектрометров взамен регистрации спектра на фотопластинку. Благодаря такой замене пользователь получает современный аналитический прибор, достоинства которого - многократное сокращение времени анализа, существенно более высокая точность (особенно при определении малых концентраций аналитов),

объективность (исключаются ошибки оператора при ручной денситометрии и построении графика), простота и меньшая стоимость обработки результатов.

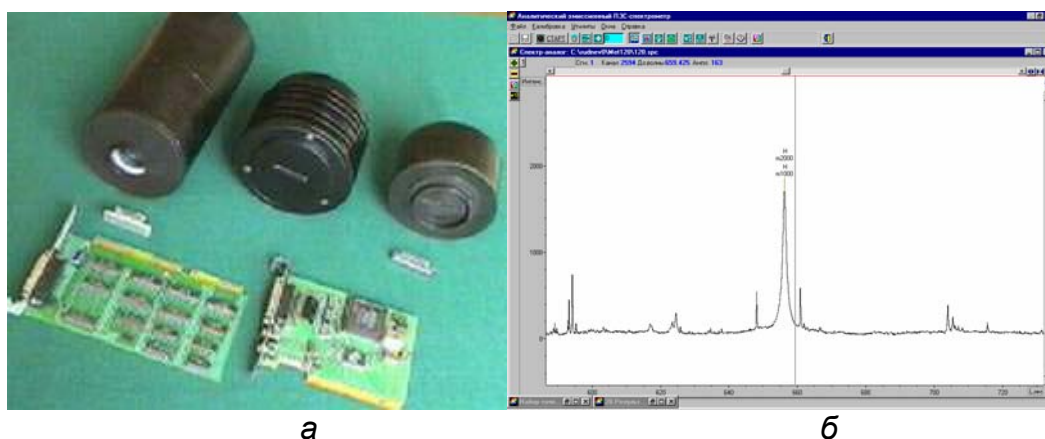


Рис. 3.

а - Фотоголовки систем регистрации МОРС; **б** – записанный с помощью МОРС участок эмиссионного спектра Н в Ti.

Основные типы разработанных систем: для регистрации спектров с высоким пространственным разрешением в видимом (200-1000 нм), УФ (170-195 нм), рентгеновском (0,2-1 нм) и ИК (0,9-1,7 мкм) диапазонах на основе различных типов ПЗС фирм Sony, Toshiba, Hamamatsu; высокочувствительные системы на базе усилителя яркости и ПЗС (в частности, для регистрации спектров КРС); системы на охлаждаемых ПЗС для длительного накопления спектров (используются, например, в астрономии).

Системы регистрации эмиссионных спектрографов для области 196-900 нм могут содержать 3-24 ПЗС и обеспечивают спектральное разрешение 2-7 А/мм и временное разрешение от 10 мс. Они допускают различные источники возбуждения спектра - лазерно-искровой, дуговой с просыпкой, дуговой двухструйный плазмотрон (ДДП). С помощью таких систем возможна реализация метода сцинтилляционной спектроскопии, обеспечивающего высокую чувствительность определения элементов (лучше 10^{-6} масс.долей %).

За последние пять лет с использованием систем МОРС совместно с Лабораторией молекулярной спектроскопии высокого разрешения и аналитической спектроскопии (В.Н.Крашенников) создана серия мини-спектрометров (весом до 3 кг) под широкий класс спектроскопических задач (разработчики - Э.Г.Силькис, А.С.Станкевич); разработан современный эмиссионный спектрометр с генератором конденсированной искры для анализа водорода в титановых сплавах (совместно с РКК «Энергия», г. Королев); создан рабочий образец эмиссионного спектрометра с дуговым двухструйным плазмотроном (с участием одного из основных разработчиков ДДП к.т.н. А.П.Тагильцева) и проведено исследование его аналитических возможностей на типовых геологических объектах, в частности, определение предельных концентраций платиноидов (уровень 10^{-4} и менее масс.долей %) и оценка предельных концентраций Мо и W в почвах.

— Созданы новые конструкции атомизаторов и вакуумных камер, источников питания, большое число электронных узлов и новые программные средства автоматизированных спектрометров (Б.Н.Борисов, В.А.Веселов, В.В.Годнев, В.М.Гусев, И.В.Колпаков, Г.Ю.Лопатовский, М.А.Павлов, В.С.Шишковский); при участии специалистов отдела ЛСП создавались также прототип автоматизированного передвижного экспресс-анализатора металлов и сплавов «Папуас» (группа к.т.н. А.М.Лившица, лаборатория МСВРАС),

низкотемпературный люминесцентный спектрометр для определения содержаний 3,4-бензпирена в природных объектах (группа д.ф.-м.н. Б.М.Харламова, лаборатория электронных спектров молекул ОМС).

— Созданы образцы портативных полифункциональных спектрометров кругового дихроизма (дихрометров СКД-2) с использованием биодатчиков разработки ИМБ РАН для высокочувствительного (10^{-7} М и ниже) определения биологически активных и токсичных соединений (БАС) в физиологических жидкостях (к.т.н.Е.Л.Михайлов, С.Ф.Кольяков, М.А.Павлов, В.В.Годнев, В.М.Гусев, Д.А.Александров, В.В.Колосов, Г.Ю.Лопатовский). В 2004 г. ЭЗНП РАН (Черноголовка Московской обл.) по документации и при авторском сопровождении ИСАН изготовил опытную партию (10 приборов) первой модификации дихрометра СКД-2, которые в настоящее время успешно используются в научных лабораториях биомедицинского и биохимического профиля. для разработки новых типов биодатчиков и методик определения БАС с целью расширения области применений указанной биотехнологии. Дихрометр зарегистрирован в Государственном реестре средств измерений под № 26900-04. В 2005 г. отдел разработал модифицированный вариант дихрометра СКД-2М (рис. 04) с улучшенными характеристиками и изготовил несколько таких приборов для других институтов. Достоинства биосенсорного метода и прибора - низкая стоимость анализа, определение большого числа различных соединений с помощью однотипных биодатчиков, отсутствие необходимости в воде и газообразном азоте, возможность работы персонала, не имеющего высокой квалификации.

Создание в ИМБ РАН биодатчиков стабилизированных форм на основе наноконструкций ДНК, иммобилизованных в гидрогелях, и такие их особенности, как диффузионная проницаемость для аналитов, рассеяние света в биоматериале, меньшая длина оптического пути в образце, потребовали разработки новой конструкции дихрометра СКД-3 со схемой вертикального формирования оптического луча и освещения гелевого образца на небольшой площадке (рис. 04). В этом приборе использована более современная элементная база, реализованы оптимальный режим осветителя, технологичный привод сканирования длины волны и другие технические решения, предусмотрено автоматическое перемещение микроплаты с образцами, расширен рабочего диапазона в УФ область спектра (до 190 нм).

Созданные биоаналитические системы (оптический биосенсоры) не имеют аналогов по принципу действия. Новизна совместной разработки двух институтов РАН подтверждена патентами РФ, США, ЕС, Германии, золотыми медалями международной выставки инноваций «Эврика-Брюссель-2001» и Президиума РАН (2002 г.), Гран-при II конкурса русских инноваций (2003 г.), дипломом Торгово-промышленной палаты РФ (2006 г.), дипломами многочисленных международных («Биотехника», «SIMEXPO—Научное приборостроение») и отечественных («Инновационные достижения», «Подмосковье» и др.) выставок. В 2007 г. проект отдела занял первое место в рейтинге победителей конкурса работ Роснауки по проведению проблемно-ориентированных поисковых исследований и созданию научно-технического задела в области живых систем по критической технологии «Биокаталитические, биосинтетические и биосенсорные технологии».



Рис. 4.

Портативные дихрометры СКД-2М и СКД-3 для решения биоаналитических задач с использованием биодатчиков на основе жидкокристаллических дисперсий и наноконструкций ДНК.

Ежегодно отдел ЛСП заключает хозяйственные договора на разработку и изготовление оптико-спектральных приборов для сторонних организаций, включая зарубежные, на сумму примерно двести тысяч долларов. Устойчивые партнерские отношения сложились с многими научными организациями страны. Отдел активно участвует в реализации академических, федеральных и международных научных проектов совместно с другими отделами и лабораториями Института. Отдел ЛСП всегда являлся основным участником от Института многих международных выставок, проводимых в Москве и за рубежом. Основная цель этих мероприятий – изучение тенденций развития приборостроения, поиск новых направлений использования и потребителей разрабатываемых приборов и методик, а также привлечение партнеров для совместной коммерциализации перспективных разработок.

Наиболее значимые награды, патенты и публикации за последние 5 лет

Награды

Гран-При и диплом за победу на II конкурсе русских инноваций (Москва, 2003 год).

Диплом Торгово-промышленной палаты РФ за проект «Биоанализаторы на основе ДНК» (2006 год).

Патенты

Нестерук И.Н. «Кварцевый генератор стабилизированный по амплитуде». Патент РФ №2212091 (2003 г.).

Ю.М.Евдокимов, С.Г.Скуридин, Б.А.Чернуха, Е.Л.Михайлов, О.Н.Компанец, С.Н.Романов, В.В.Колосов. «Method for determination of a biologically active substance in an analyzed liquid and device for its realization». European Patent No.799P79231 (2005).

Нестерук И.Н. «Оптический датчик углового перемещения». Патент РФ №2317523 (2008 г.).

Литература

1. О.Н.Компанец. «Портативные оптические биосенсоры для определения биологически активных и токсичных соединений». - Успехи физических наук, 2004, т.174, №6, с.686-690. Physics-Uspekhi, 2004, 47(6), p.630-633.

2. Karu T.I., Pyatibrat L.V., Kolyakov S.F., Afanasyeva N.I. «Absorption measurements of a cell monolayer relevant to phototherapy: Reduction of cytochrome c oxidase under near IR radioation». - Journal of Photochemistry and Photobiology, 2005, v.81, p.98-106.
3. Karu T.I., Kolyakov S.F. «Exact Action Spectra for Cellular Responses Relevant to Phototherapy». - Photomedicine and Laser Surgery, 2005, v.23, No.4, p.355-361.
4. Евдокимов Ю.М., Скуридин С.Г., Компанец О.Н. «Аналитическая система на основе жидких кристаллов нуклеиновых кислот: идеология, создание, применение. В кн.: "Биологические и медицинские технологии: от научных результатов – к инновационным разработкам», изд.ИНБИ, Москва, 2005, с. 3-5.
5. A.V. Potapov, S.F. Kolyakov, V.N. Krashenninnikov, B.S.Dumesh. «Circular dichroism of crude oil and its derivatives.Role of permolecular structures». - Journal of Colloid and Interface Science, v.303, Number 1, 2006, p 159–163.
6. Скуридин С.Г., Дубинская В.А., Лагутина М.А., Компанец О.Н., Голубев В.Г., Ребров Л.Б., Быков В.А., Евдокимов Ю.М. «Выявление генотоксикантов растительного происхождения при помощи биодатчиков пленочного типа». Биомедицинские технологии и радиоэлектроника, 2006, №3, с.38-43.
7. Потапов А.В., Кольяков С.Ф., Крашенинников В.Н., Думеш Б.С. «Оптический круговой дихроизм как новый метод определения концентрации нижнего агрегационного порога асфальтенов в нефти». Технологии нефти и газа, 2006, №6, с.58-62.
8. Евдокимов Ю.М., Захаров М.А., Компанец О.Н., Скуридин С.Г. «Биоаналитическая система для определения биологически активных соединений и лекарственных веществ». В кн.: «Аналитические методы в медицинской диагностике», изд. MVK, Москва, 2006, с.43-44.
9. С.Г.Скуридин, В.А.Дубинская, О.Н.Компанец, Ю.М.Евдокимов. «Новый тип биодатчиков для биотехнологии и медицины». Альманах клинической медицины, 2006, т.XII, с.119.
10. Гусев В.М., Кольяков С.Ф., Компанец О.Н., Павлов М.А., Евдокимов Ю.М., Скуридин С.Г. «Оптический биосенсор на основе портативного дихрометра с использованием биочипов на жидких кристаллах ДНК». Альманах клинической медицины, 2006, т.XII, с.131.
11. O. N. Kompanets, S. G. Skuridin, V. M. Gusev, S. F. Kolyakov, M. A. Pavlov, Yu. M. Yevdokimov. «Analytical system based on liquid-crystalline DNA particles immobilized in content of polymeric hydrogel and a portable dichrometer». Proceedings of SPIE, vol. 6733, 2007.
12. Нестерук И.Н. «Современные гальванометрические сканаторы». Лазер-информ, №5, март 2007, стр. 9-10.
13. Нестерук И.Н. «Гальванометрические сканаторы для лазерных маркирующих комплексов». Фотоника №3, 2007, стр. 10-11.

ОТДЕЛ МОЛЕКУЛЯРНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ



Отдел молекулярной спектроскопии был создан в 1986 г. под руководством профессора Р.И. Персонова, который был его бессменным руководителем вплоть до безвременной кончины в 2002 г. При создании отдела в его состав вошли три лаборатории: лаборатория электронных спектров молекул (зав. лабораторией - проф. Р.И. Персонов); лаборатория молекулярной спектроскопии высокого разрешения и аналитической спектроскопии (зав. лабораторией - к.ф.-м.н. В.Г. Колошников) и лаборатория колебательных и вращательных спектров молекул (зав. лабораторией проф. - М.Р. Алиев), а также тематическая группа "Колебательные спектры молекул" (зав. группой - д.х.н. Я.М. Кимельфельд).

После скоропостижной смерти М.Р. Алиева в 1988 г., а затем смерти Р.И. Персонова структура отдела изменялась. В настоящее время отдел состоит из лаборатории молекулярной спектроскопии высокого разрешения и аналитической спектроскопии (зав. лабораторией к.ф.-м.н. В.Г. Колошников) и двух секторов: сектора электронных спектров молекул (зав. сектором д.ф.-м.н. Ю.Г. Вайнер) и сектора микроволновой спектроскопии (зав. сектором д.ф.-м.н. Б.Н. Думеш). В отделе работают 26 сотрудников, из них 5 докторов и 12 кандидатов наук. Заведует отделом к.ф.-м.н. В.Г. Колошников (на фото). В отделе ведутся экспериментальные и теоретические исследования по спектроскопии сложных молекулярных систем и молекулярной спектроскопии. Значительное внимание в отделе уделяется также прикладным исследованиям в области аналитической спектроскопии и спектрального приборостроения.

Лаборатория молекулярной спектроскопии высокого разрешения и аналитической спектроскопии

Лазерная атомно-флуоресцентная спектрометрия (ЛАФС)



Начиная с 1972 г., в лаборатории проводились исследования по лазерной атомно-флуоресцентной спектрометрии (ЛАФС) (д.ф.-м.н. М.А. Большов (на фото), к.ф.-м.н. А.В. Зыбин, к.ф.-м.н. В.Г. Колошников, проф. С.Л. Мандельштам) [1]. Был проведен большой объем исследований, позволивших разработать теоретические основы метода ЛАФС, определить оптимальные условия возбуждения и регистрации флуоресценции, выявить основные процессы, ограничивающие чувствительность метода и его пределы обнаружения для многих элементов. Цикл совместных работ с различными научными и научно-производственными организациями позволил продемонстрировать достоинства метода ЛАФС при анализе реальных объектов (сверхчистые материалы, технологические растворы, почвы, биологические пробы и т.д.). Итогом систематических исследований явилось

создание аналитического прибора – Лазерного Атомно-Флуоресцентного Аналитического Спектрометра – ЛАФАС-1 [2]. Этот уникальный по тому времени

комплекс был создан совместно с лабораторией лазерно-спектрального приборостроения (зав. лабораторией д.ф.-м.н. О.Н. Компанец). На спектрометре ЛАФАС - 1 были достигнуты рекордные для прямых экспрессных методов анализа пределы обнаружения металлов вплоть до $10^{-10-11}\%$ (по массовой концентрации) при объеме пробы (30–50) мкл, что соответствует абсолютному пределу обнаружения несколько фемтограмм определяемого элемента. На рисунках 1-3 приведены отдельные части комплекса ЛАФАС-1



Рис.1. Аналитическая часть ЛАФАС-1, помещенная в чистый бокс.

Следует отметить, что вначале эти пределы обнаружения были получены путем линейной экстраполяции градуировочной прямой к уровню тройных флуктуаций так называемого «инструментального фона», который определялся шумами системы регистрации, неселективным рассеянием лазерного излучения, тепловым излучением горячего атомизатора и т.п. Этот фон не учитывал чистоты используемой посуды, чистоты воздуха в лаборатории и содержания определяемого элемента в деионизованной воде, т.е. не учитывал уровень «холостого опыта». Реально минимально измеряемая концентрация элементов в условиях обычной лаборатории института и с имевшимися реактивами и оборудованием составляла $\sim 10^{-7}\%$. Работами нашей группы заинтересовались сотрудники Лаборатории гляциологии и геофизики Гренобльского университета (LGGE), Франция, во главе с профессором К. Бутроном. Они в течение многих лет занимались изучением естественных вариаций тяжелых металлов в полярных льдах. Содержание таких металлов как Pb, Cd, Bi и др. в кернах льда из глубинных скважин оказалось на уровне ниже $10^{-8-9}\%$. В то время не существовало методов прямого (без предварительного концентрирования) определения таких сверхнизких содержаний. Французские коллеги предложили совместный проект по измерению природных вариаций тяжелых металлов в различные палеоклиматические эпохи, однако для



Рис. 2. Дозирование пробы в атомизатор.

проведения таких исследований в ИСАН'е ЛАФАС-1 пришлось поместить в специальный аналитический комплекс. В аналитическом центре была создана чистая комната, внутри которой был размещен чистый бокс. Аналитическая часть ЛАФАС-1 размещалась в чистом боксе, а лазерная часть находилась в чистой комнате вне бокса. На Рис. 1 приведен вид аналитической части комплекса, помещенной в чистую камеру.

На Рис. 2 показана процедура дозирования пробы в камеру атомизатора, а на Рис. 3 показан пример отображения на мониторе полного цикла испарения пробы и регистрации сигнала флуоресценции при введении в атомизатор 50 мкл пробы, содержащей 5 мкг/л свинца ($5 \times 10^{-7}\%$). На левой части экрана отображен временной ход сигнала

флуоресценции, а на правой части – временной ход температуры графитового атомизатора, нагреваемого по разработанной программе. После создания этого комплекса началась совместная работа с французскими коллегами. Чистая деионизованная вода, растворы сравнения, образцы полярных льдов и снега, посуда, реактивы, микропипетки для дозирования проб привозились из Франции, а измерения проводились на комплексе ЛАФАС-1. В первых же опытах с чистыми пробами и чистыми стандартными растворами, приготовленными в Гренобле, была подтверждена правильность наших «экстраполяционных» пределов и практически реализованы пределы определения на уровне $10^{-10-11}\%$.

На аналитическом комплексе ЛАФАС-1 был выполнен цикл исследований по определению содержания тяжелых металлов во льдах и снегах Арктики и Антарктики (М.А. Большов, С.Н. Руднев совместно с группой профессора К. Бутрона из LGGE). Сложность этих исследований связана с чрезвычайно низким содержанием определяемых элементов в образцах. Для получения надежных данных потребовалось разработать специальные методы сбора образцов (К. Бутрон) и специальные процедуры пробоподготовки, гарантирующие отсутствие неконтролируемых загрязнений образцов в процессе работы. Для примера, на Рис.4 показана процедура подъема на поверхность керна глубинного льда из французской скважины в Антарктиде Dome C.

Для свинца и кадмия при прямом (без предварительного концентрирования) анализе жидких образцов массой до 50 мг был достигнут относительный предел обнаружения на уровне $10^{-11}\%$ (абсолютный предел обнаружения элементов $\leq 5 \times 10^{-15}$ г).



Рис. 4. Подъем керна льда на французской станции Dome C.

тяжелых металлов в далекие доисторические эпохи, так и о глобальном загрязнении планеты в последние столетия, связанном с антропогенной деятельностью [3-6].

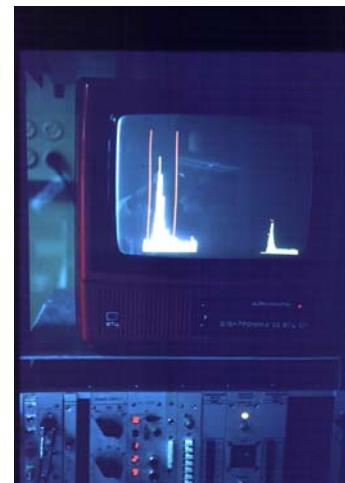


Рис. 3. Цикл измерения одной пробы. Левая часть экрана – временной ход сигнала с ФЭУ, правая часть – заданное программой изменение температуры атомизатора.

Важным элементом проведенных исследований являлось то, что образцы льдов отбирались не только с поверхности, но и из скважин глубокого бурения (скважина "Dome C" глубиной до 900 м и скважина "Восток" глубиной до 2050 м).

Содержания свинца и кадмия в глубинных льдах Антарктики, определенные на комплексе ЛАФАС-1, представлены на Рис.5. Эти результаты продемонстрировали значительные естественные вариации содержания тяжелых металлов в атмосфере Земли в исторические периоды, предшествовавшие росту антропогенного воздействия на природу.

Анализ всех этих образцов позволил получить данные как о естественных, природных вариациях в последние столетия, связанном с антропогенной

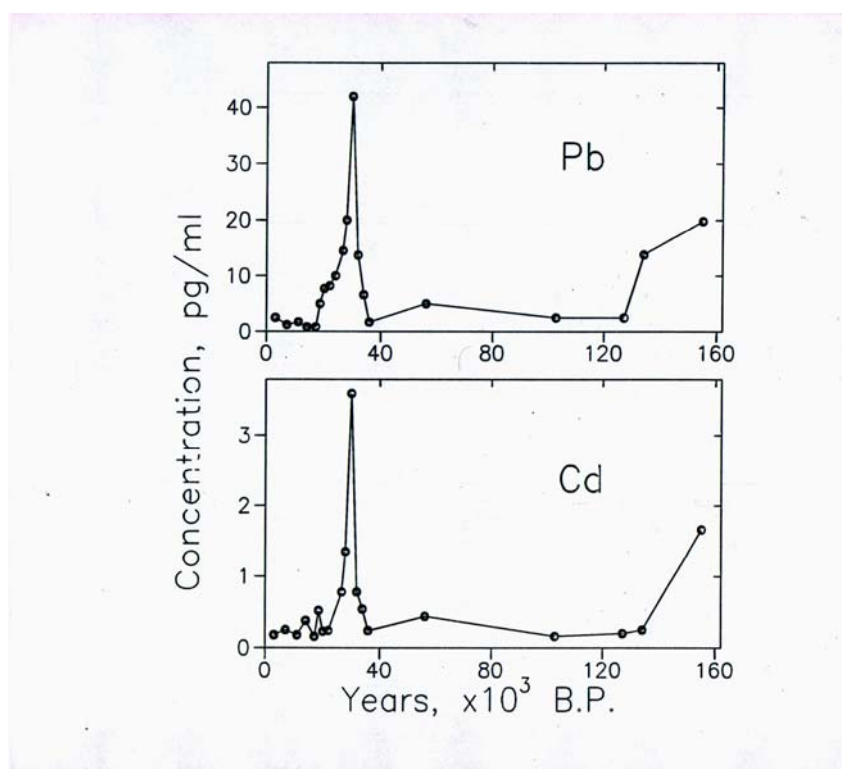


Рис. 5. Вариации концентраций Pb и Cd в глубинных льдах Антарктики.

Литература

- 1 Большов М.А., Гузеев И.Д., Зыбин А.В., Колошников В.Г., Майоров И.А., Недлер В.В., Мандельштам С.Л., Тимофеев Е.Ф., Филимонов Л.Н. Определение малых концентраций Na методом резонансной флуоресценции с использованием перестраиваемого импульсного лазера на красителях. *Журнал прикл. спектроскопии*, (1973), **19**, 821.
- 2 Apatin V.M., Arkhangel'skii B.V., Bolshov M.A., Ermolov V.V., Koloshnikov V.G., Kompanetz O.N., Kusnetsov N.I., Mikhailov E.L., Shishkovsky V.S., Boutron C.F. Automated laser excited atomic fluorescence spectrometer for determination of trace concentrations of elements. *Spectrochimica Acta*, (1989), **44B**, 253.
- 3 Bolshov M.A., Boutron C.F., Zybin A.V. Determination of lead in Antarctic ice at the picogram-per-gram level by laser atomic fluorescence spectrometry. *Anal.Chem.*, (1989), **61**, 1758.
- 4 C.F.Boutron, U.Görlach, J.-P.Candelone, M.A.Bolshov, R.J.Delmas. Decrease in antropogenic lead, cadmium and zinc in Greenland snows since the late 1960s. *Nature*, (1991), **v.353**, pp. 153-156.
- 5 M.A.Bolshov, S.N.Rudnev, A.A.Rudneva, C.F.Boutron, H.Hong. Determination of heavy metals in polar snow and ice by laser excited atomic fluorescence spectrometry with electrothermal atomization in a graphite cup. *Spectrochim.Acta*, (1997), **52B**, pp.1535-1544.
- 6 C.P.Ferrari, S.Hong, K.Van de Velde, C.F.Boutron, S.N.Rudnev, M.A.Bolshov, W.Chisholm, K.J.Rosman. Biogenic, rock and soil dust, volcanic and antropogenic bismuth in central Greenland recent snow and ancient ice. *Atmospheric Environment* (2000), **34**, 941-948.
- 7 C. Boutron, K. Rosman, C. Barbante, M. Bolshov, F. Adams, Sungmin Hong, Ch. Ferrari L'archivage des activités humaines par les neiges et glaces palaires: le cas du plomb (in English) *C.R.Geoscience*, (2004), 336, 847-867.

8. C. Barbante, M. Schwikowski, T. Doring, H. Gaggeler, U. Schotterer, L. Tobler, K. van de Velde, Ch. Ferrari, G. Cozzi, A. Turetta, K. Rosman, M. Bolshov, G. Capodaglio, P. Cescon, C. Boutron. Historical record of European emissions of heavy metals to the atmosphere since the 1650s from Alpinesnow/ice cores drilled near Monte Rosa *Environmental Science and Technology*, (2004), 38, 4085-4090.

Диодная лазерная спектроскопия

Работы по исследованию возможностей применения перестраиваемых полупроводниковых лазеров на халькогенидах свинца-олова для спектроскопии высокого разрешения в ИК-области спектра были начаты в группе в 1969 г.

На первом этапе были проведены исследования характеристик лазеров, работающих в импульсном режиме, при использовании для перестройки частоты генерации высокого гидростатического давления, магнитного поля, температуры.

Была продемонстрирована возможность регистрации спектров высокого разрешения при работе лазеров в импульсном режиме при азотных температурах (к.ф.-м.н. Ю.А.Курицын). Получены спектры молекул NH_3 и $^{15}\text{NH}_3$ с разрешением, ограниченным доплеровским уширением. Исследован эффект Зеемана в колебательно-вращательном спектре молекулы аммиака, не имеющей электронного магнитного момента [1]. Отсутствие последнего приводит к тому, что зеемановское расщепление оказывается чрезвычайно малым и составляет $\sim 10^{-2} \text{ см}^{-1}$ в магнитном поле $\sim 500 \text{ кГс}$. Эффект удалось зарегистрировать при использовании импульсного магнита и синхронизированного с ним диодного лазера, также работающего в импульсном режиме (рис. 1).

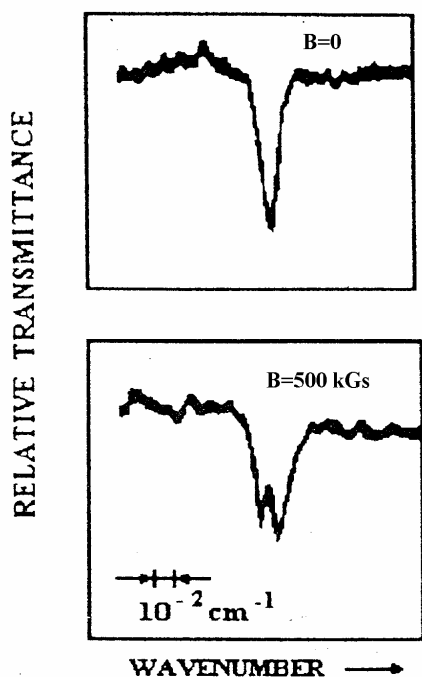


Рис. 1. Спектры поглощения молекулы NH_3 в области линии $\text{asR}(4,1)$ колебательной полосы ν_2 в отсутствие магнитного поля (вверху) и в магнитном поле $B=500 \text{ кГс}$ (внизу). Спектры получены с помощью импульсного диодного лазера на PbSnTe , работавшего при $T=60 \text{ К}$. Длительность импульса тока накачки 100 мкс , скорость перестройки $0,025 \text{ см}^{-1}/\text{мкс}$. Спектры зарегистрированы за один импульс.

Накопленный опыт работы с диодными лазерами позволил создать лабораторный вариант диодного лазерного спектрометра (Ю.А.Курицын, В.М.Кривцун, Е.П.Снегирев) со следующими основными характеристиками:

	Типичные значения	Предельные значения
рабочая область спектра	4-20 мкм	4-46 мкм
спектральное разрешение	10^{-4} см^{-1}	$2 \times 10^{-5} \text{ см}^{-1}$
временное разрешение	100 нс	4 нс
точность определения волновых чисел	$10^{-3} - 10^{-4} \text{ см}^{-1}$	$5 \times 10^{-5} \text{ см}^{-1}$
пороговая чувствительность по коэффициенту поглощения на 1 м поглощаемого слоя	10^{-7} см^{-1}	$2 \times 10^{-9} \text{ см}^{-1}$
то же при использовании много-ходовой кюветы (40 м)	$5 \times 10^{-9} \text{ см}^{-1}$	10^{-9} см^{-1}

С использованием этого спектрометра был выполнен ряд исследований спектров молекул типа сферического волчка. Изучены запрещенные переходы в молекуле GeH_4 [2]. Подробно исследованы (к.ф.-м.н. Д.А.Садовский, В.М.Кривцун) критические явления в колебательно-вращательных спектрах, возникающие в узких интервалах изменения J в процессе возрастания вращательного возбуждения (рис.2). К числу изученных критических явлений относятся бифуркации в полосе ν_3 и "дьявольская точка" в области пересечения

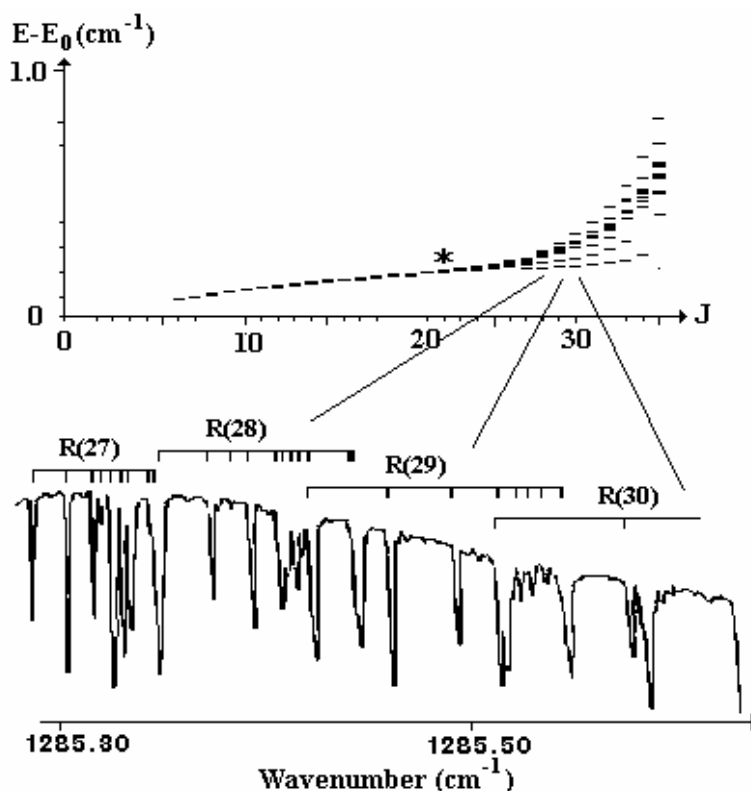


Рис. 2. Вверху — диаграмма энергетических уровней колебательного состояния ν_3 молекулы CF_4 ; внизу — спектр высокого разрешения R-ветви полосы ν_3 , полученный с помощью спектрометра на перестраиваемых диодных лазерах. Звездочкой на диаграмме уровней отмечено состояние $J=22$, отвечающее критической точке. При $J>22$ наблюдается качественное изменение характера вращательного движения, приводящее к изменению структуры колебательно-вращательного спектра.

поверхностей вращательной энергии состояний ν_1 и ν_3 молекулы SnH_4 , кроссовер в $\nu_3(\text{F}_2)$ молекулы CF_4 [3,4].

Отдельный цикл работ был посвящен исследованиям нестационарных молекулярных процессов. В том числе: спектроскопическое исследование радикалов NH_3 , образующихся при импульсном фотолизе аммиака (Ю.А.Курицын, В.М.Кривцун); исследование динамики бесстолкновительного возбуждения

молекул в области нижних колебательно-вращательных уровней при воздействии на молекулы интенсивного ИК-излучения (Ю.А.Курицын, к.ф.-м.н. И.Пак, совместно с д.ф.-м.н. Г.Н.Макаровым) [5]; исследование ИК спектров поглощения молекул CrO_2Cl_2 в области квазиконтинуума (Ю.А.Курицын, В.М.Кривцун, Е.П.Снегирев совместно с д.ф.-м.н. А.А.Пурецким) [6].

Наконец, следует упомянуть разрабатывавшиеся в лаборатории методы спектрального анализа газов с использованием диодных лазеров (Ю.А.Курицын, В.М.Кривцун, Е.П.Снегирев). В однопроходных и многоходовых кюветах проводились определения примесей NH_3 , NO , NO_2 , CO , H_2O , в воздухе и примеси PH_3 в GeH_4 . Показано, что достижим относительный предел обнаружения на уровне $10^{-7}\%$.

Работы по диодной лазерной спектроскопии были отмечены Государственной премией СССР 1985 г. (В.Г.Колошников и Ю.А.Курицын совместно с сотрудниками ряда других научных организаций).



Сотрудники группы диодной лазерной спектроскопии (слева-направо): Ю.А.Курицын, М.А.Большов, Е.П.Снегирев, В.М.Кривцун, В.Р.Мироненко.

На протяжении многих лет наша группа ведет плодотворное сотрудничество с Институтом Аналитических Наук (ISAS, ICAC, г. Дортмунд, Германия) в области разработки теоретических основ и практических методик атомно-абсорбционного анализа с использованием диодных лазеров (ДЛ) видимого и ближнего ИК диапазона - (ДЛ-ААС) [7]. Разработанный ранее применительно к задачам молекулярного анализа метод модуляции длины волны ДЛ с последующим детектированием сигнала на гармониках частоты модуляции был успешно применен и для элементного анализа. Сотрудниками группы предложен и реализован метод логарифмической регистрации абсорбционного сигнала, позволяющий достичь порога чувствительности, определяемого дробовыми шумами излучения диодного лазера (к.ф.-м.н. В.В. Лигер, А.В. Зыбин, Ю.А. Курицын) [8,9]. Был предложен и реализован метод измерения поглощения в реальных аналитических условиях при наличии вибраций, дыма, турбулентности газовых потоков и других изменений интенсивности регистрируемого излучения, не связанных с селективным поглощением. На основе этого метода создан атомно-абсорбционный анализатор с динамическим диапазоном по оптической плотности от 3×10^{-8} до 2,3 (В.В. Лигер, А.В. Зыбин, Ю.А. Курицын) [10].

В совместных работах с группой в ICAC (Дортмунд) был выполнен цикл работ, в которых достоинства и возможности метода ДЛ-ААС продемонстрированы при детектировании малых концентраций ряда элементов. Для расширения спектрального диапазона работы ДЛ-ААС в этих работах использовалось удвоение частоты генерации лазеров в нелинейных кристаллах [10, 11].

В аналитике последнее время на передний край выходит задача определения не валового содержания элементов в пробах, а различных форм их соединений. Связано это с тем обстоятельством, что один и тот же элемент в

различных химических комплексах или валентных состояниях может быть либо токсичным, либо существенно важным для живых организмов. Было показано, что для определения форм соединений элементов метод ДЛ-ААС может в ряде практически важных случаев успешно конкурировать с наиболее чувствительным и дорогостоящим методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой [11-13].

В последние годы был разработан новый вариант метода, открывающий возможности детектирования не только узких линий поглощения атомов в газовой фазе, но и широких линий поглощения молекул в конденсированных средах. Идея метода заключается в просвечивании исследуемого объекта излучением двух ДЛ со специально подобранными длинами волн излучения и регистрации сигнала дифференциального поглощения. Длины волн ДЛ выбираются вблизи локального максимума широкой линии поглощения некоторого «реперного» компонента среды. Подбором параметров ДЛ можно минимизировать уровень исходного «фоновый» сигнала дифференциального поглощения, а увеличение сигнала разностного поглощения будет являться мерой изменения того параметра исследуемого объекта, который вызывает сдвиг или деформацию исходного спектра поглощения (температура, pH, состав смеси и т.п.). Такая методика позволяет количественно измерять изменения различных параметров среды. Этот вариант метода дифференциального поглощения был успешно испытан на примере создания дистанционного бесконтактного датчика температуры для капиллярного изотахофореза и для диагностики функционального состояния биоткани [14-19].

Дистанционное измерение температуры газовых потоков с помощью метода дифференциального поглощения излучения двух диодных лазеров (ДЛ), настроенных на разные линии поглощения тестовой молекулы известно и применяется достаточно давно. Однако, эта методика разработана и используется для определения температуры протяженных образований (длина поглощающего слоя ~ 10 м и более) и за времена от нескольких секунд до нескольких десятков секунд. Для диагностики процессов горения в специализированных экспериментальных камерах требуется измерять поглощение в существенно более сложных условиях, при длинах поглощающего слоя 1–10 см и временах развития процесса горения порядка десятка миллисекунд, что требует существенного повышения чувствительности.

Для реализации необходимой чувствительности измерений было необходимо определить основные источники помех и шумов, выработать новый алгоритм измерения сигналов поглощения и их отношения и разработать принципиально новые электронные узлы системы регистрации.

В первых экспериментах в качестве тестовой молекулы использовался молекулярный кислород, являющийся основным компонентом горючей смеси. Был разработан комплекс аппаратуры, включающий: 1) оптический блок с двумя ДЛ и 4-мя фотоприемниками для измерения интенсивности излучения в двух измерительных и двух опорных каналах; 2) оптическую систему ввода и вывода излучения в исследуемый объект; 3) оригинальные электронные блоки в системе модуляции длины волны излучения лазеров и системе регистрации. Основным объемом экспериментов выполнен с парой линий поглощения O_2 - $\lambda_1 = 765.62$ нм и $\lambda_2 = 763.31$ нм.

Работоспособность аппаратуры и методики измерения была проверена при измерении температуры этилен-воздушного пламени. В измерительный тракт помещалась горелка. На первом этапе до включения горелки оптическая длина референтных каналов подстраивалась таким образом, чтобы сигналы поглощения кислорода в оптическом тракте были равны нулю. Измерялась базовая линия в

обоих каналах. После включения пламени проводился цикл измерения сигналов поглощения на двух длинах волн. Пример записи сигналов при включенном

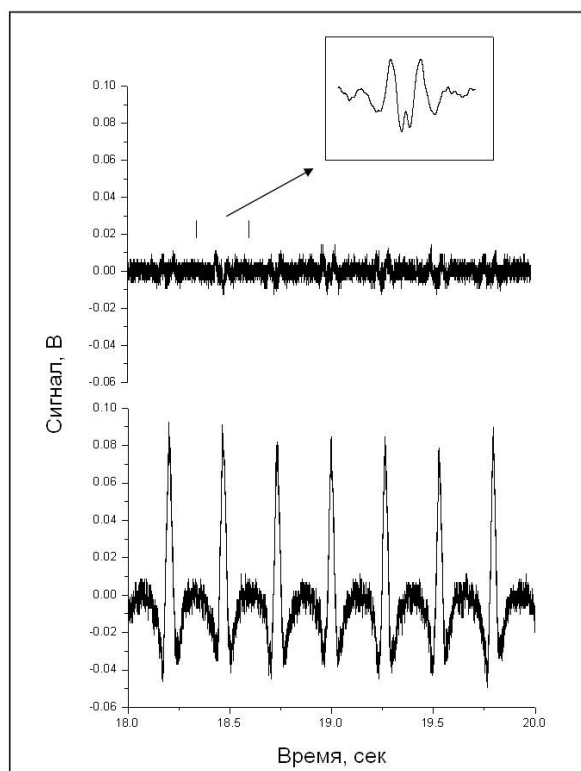


Рис. 3. Результаты измерения изменений сигналов на двух длинах волн, вызванных поглощением кислородом в этилен-воздушном пламени. Измерения проводились на второй гармонике синусоидальной модуляции частоты излучения диодных лазеров $2f=260$ кГц при дополнительном сканировании пилообразным напряжением с частотой 4 Гц. Верхняя кривая соответствует $\lambda_1 = 765.62$ нм, нижняя $\lambda_2 = 763.31$ нм.

пламени приведен на Рис. 3. Верхний скан представляет сигнал поглощения на линии 765.62 нм, нижний – на линии 763.31 нм. В соответствии со спектроскопическими параметрами переходов изменения сигналов поглощения на двух выбранных линиях значительно разнятся. На верхней вставке на рисунке приведена запись того же сигнала при включении процедуры цифровой фильтрации.

Температура в пламени определялась из сопоставления измеренного отношения сигналов на двух длинах волн с данными, полученными из спектроскопической базы HITRAN. Рассчитанный калибровочный график представлен на Рис. 4. Привязка к графику осуществлялась путем измерения отношения сигналов на λ_1, λ_2 при комнатной температуре в кювете с известным содержанием кислорода. Средняя по оптической толщине зоны горения температура пламени, измеренная таким методом, оказалась равной ~ 1050 К.

Использование молекулы кислорода в качестве тестовой молекулы оказалось не оптимальным по ряду существенных причин. Главной из них оказалось

значительное поглощение в атмосфере лабораторного воздуха на открытой трассе луча от источника до объекта. За счет этого полезный сигнал дифференциального поглощения должен определяться как разность двух больших сигналов. За счет сильных флуктуаций в обоих каналах минимально измеряемый разностный сигнал поглощения оказался на уровне 10^{-3-4} , что выше расчетной величины, определяемой разностью температур в зоне горения.

В настоящее время исследуется иной подход. В качестве тестовой выбрана молекула воды, а зондирование производится излучением перестраиваемого лазера в диапазоне 1.39 мкм. Используемый тип ДЛ обеспечивает плавную перестройку в диапазоне ~ 1.5 см $^{-1}$, что позволяет за один скан ДЛ зарегистрировать несколько линий поглощения молекул воды, соответствующих переходам с различных нижних подуровней. Излучение ДЛ доставляется к исследуемому объекту по одномодовому оптическому волокну. Прошедшее через объект излучение собирается на приемный торец многомодового волокна и по нему поступает на приемник. Возможность регистрации нескольких линий поглощения тестовой молекулы за один скан одного ДЛ должно повысить надежность извлечения информации о температуре зондируемой зоны.

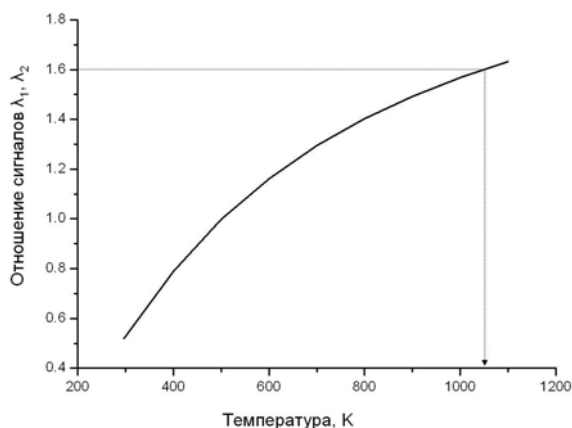


Рис. 4. Зависимость отношения сигналов поглощения кислородом на $\lambda_1 = 765.62$ нм и $\lambda_2 = 763.31$ нм от температуры, полученная из спектроскопической базы данных [20]. Измеренное в пламени отношение сигналов оказалось равным 1.6, что соответствует температуре ~ 1050 К.

Литература

1. Koloshnikov V.G., Kuritsyn Yu.A., Pak I., Ulitskii N.I., Kharlamov B.M., Britov A.D., Zasavitskii I.I., Shotov A.P. Zeeman effect in the IR spectrum of a molecule without an electronic moment. Observation with a tunable diode lasers. Opt.Commun., 35, 213 (1980).
2. Cheglovkov A.E., Kuritsyn Yu.A., Snegiriv E.P., Ulenikov O.N., Vedeneeva G.V. High-resolution spectroscopy of the ν_2 Q-branch of GeH_4 with a computer-assisted, pulsed-diode laser spectrometer. J.Mol.Spectrosc., 105, 385 (1984).
3. а) Даварашвили О.И., Жилинский Б.И., Кривцун В.М., Садовский Д.А., Снегирев Е.П. Экспериментальное изучение последовательности квантовых бифуркаций, приводящей к перевороту вращательного мультиплета. Письма в ЖЭТФ, 51, 17 (1990). б) Krivtsun V.M., Sadovskii D.A., Zhilinskii B.I. Critical phenomena and diabolic points in rovibrational energy spectra of spherical top molecules. J.Mol.Spectrosc., 139, 126, (1990).
4. Krivtsun V.M., Kuritsyn Yu.A., Mironenko V.R., Pak I., Snegirev E.P. Spectroscopic investigations with pulsed Pb-salt diode lasers. Spectrochim. Acta Part A, 1996, v.52, No.8, pp.925-953.
5. а) Апатин В.М., Кривцун В.М., Курицын Ю.А., Макаров Г.Н., Пак И., Засавицкий И.И., Шотов А.П. Диодная спектроскопия молекул SF_6 охлажденных в импульсной струе, при ИК многофотонном возбуждении. Письма в ЖЭТФ, 37, 365 (1983). б) Курицын Ю.А., Макаров Г.Н., Пак И., Сотников М.В. Исследование бесстолкновительного возбуждения молекул SF_6 и NH_3 в интенсивном ИК лазерном поле с помощью перестраиваемого диодного лазера. ЖЭТФ, 94, 65 (1988).
6. Евсеев А.В., Кривцун В.М., Курицын Ю.А., Макаров А.А., Пурецкий А.А., Рябов Е.А., Снегирев Е.П., Тяхт В.В. ИК-спектр поглощения молекул CrO_2Cl_2 , приготовленных в высоколежащем состоянии колебательного квазиконтинуума. ЖЭТФ, 87, 111(1984).
7. Гроль Х., Зыбин А.В., Нимакс К., Шнюрер-Пачан К. Диодные лазеры в атомно- абсорбционной аналитической спектроскопии: снижение пределов обнаружения за счет измерения малых поглощений. Оптика и спектроскопия, 1994, т.76, N 3, с.502-505.
8. Liger V.V., Zybin A.V., Kuritsyn Yu.A., Niemax K. Diode-laser atomic-absorption spectrometry by the double-beam - double-modulation technique. Spectrochimica Acta B, 1997, v.52, pp.1125-1138.
9. Лигер В.В., Курицын Ю.А., Кривцун В.М., Снегирев Е.П., Кононов А.Н. Измерение поглощения с помощью диодного лазера с порогом обнаружения,

определяемым квантовыми шумами излучения. - *Квантовая электроника*, (1997), т. 24, № 4, с. 371-376

10. Zybin, A.V.; Liger, V.V.; Kuritsyn, Yu.A.: Dynamic range improvement and background correction in diode laser atomic absorption spectrometry. *Spectrochim. Acta B*, (1999), **54B**, pp. 613-619

11. Zybin A.V. Schnürer-Patschan, C., Bolshov, M.A., Niemax, K. Elemental analysis by diode laser spectroscopy. *Trends in analytical chemistry*, (1998), **v.17**, NN8,9, pp 513-519.

12. Butcher, D., Zybin, A., Bolshov, M., Niemax, K. Speciation of Methylcyclopentadienyl Manganese by high-performance liquid chromatography – diode laser atomic absorption spectrometry. *Anal. Chem.* (1999), **v.71**, pp 5379-5385

13. Butcher, D., Zybin, A., Bolshov, M., Niemax, K. Diode laser atomic absorption spectrometry as a detector for metal speciation. *Reviews in Analytical Chemistry*, (2001), **v.20**, N2, pp. 79-100.

14. Krivtun, V., Grass, B., Hergenröder, R., Bolshov, M., Niemax, K., Zybin, A.: Temperature measurement of liquids by differential absorption of two diode lasers: Application to contactless optical detection in isotachopheresis. *Appl. Spectrosc.*, (2001), **v.55**, No.9, pp. 1251-1258.

15. Liger, V., Zybin, A., Bolshov, M., Niemax, K.: Dual wavelength method for molecular difference absorption measurements in turbid media. *Appl. Spectrosc.*, (2002), **v.56**, N 2, pp. 250-256.

16. В.В. Лигер, М. А. Большов, Ю.А.Курицын, В. М. Кривцун, А. В.Зыбин, К. Нимакс. «Метод двухволнового дифференциального поглощения для определения параметров конденсированных сред.» В “Оптическая спектроскопия и стандарты частоты”, ред. Л.Н.Синица и Е.А.Виноградов, Томск, Изд. ИОА СО РАН, 2004.

17. В.В. Лигер, М. А. Большов, Ю.А.Курицын, В. М. Кривцун, А. В.Зыбин, К. Нимакс. «Двухволновой метод дифференциального поглощения для определения параметров конденсированных сред», Оптика и спектроскопия, 2005, т. 99, N4, сс. 693-704.

18. Liger V.V., Zybin A.V., Niemax K., Kuritsyn Yu.A., Bolshov M.A. Double wavelength differential absorption as a technique for early diagnostic of breast cancer - in Current Research on Laser Use in Oncology: 2000-2004, Proc. SPIE, 2005, v. 5973, 597304-(1-9)

19. Liger V.V., Bolshov M.A., Kuritsyn Yu.A., Krivtsun V.M., Zybin A.V., Niemax K. Diode Laser Differential Absorption Spectrometry for Measurements of Some Parameters of Condensed Media. - *Spectrochim. Acta A*, 2007, (submitted).

20. Информационная система "SPECTRA", <http://spectra.iao.ru> .

Спектральный анализ металлов и сплавов

Исследования в области эмиссионного спектрального анализа металлов и сплавов были начаты в лаборатории приборостроения в восьмидесятых годах прошлого столетия по инициативе С.Л.Мандельштама. Основная цель работ состояла в создании на базе многоэлементных твердотельных приемников излучения малогабаритных спектрометров, предназначенных для сортировки металлических сплавов. Использование таких приемников позволило разработать методы анализа и создать аппаратуру, способную надежно работать непосредственно в цехах заводов и в складских помещениях[1,2]. На базе этих разработок фирма ООО «Спектроприбор», проведя соответствующие ОКР, наладила производство эмиссионных спектрометров типа «ПАПУАС» для контроля за составом как цветных, так и черных сплавов.

Последние годы в группе к.т.н. А.М.Лившица проводились исследования параметров излучающей плазмы, создаваемой генераторами высоковольтной искры, которые применяются в указанных выше спектрометрах. Используя появившиеся возможности современной вычислительной техники, а также новейшие изделия электронных комплектующих (как, например, приборы с зарядовой связью), удалось разработать методики учета и исключения влияния «третьих» элементов, структуры вещества и колебаний атмосферных условий на результаты анализа металлических сплавов эмиссионными спектрометрами [3-5]. Указанные результаты были получены с использованием опыта работы в реальных условиях более сотни спектрометров ПАПУАС-4. Работы велись в тесном сотрудничестве с ООО «Спектроприбор», разработчиком и производителем спектрометров ПАПУАС-4.

В настоящее время исследования в области спектрального анализа металлических сплавов, благодаря конкретным результатам, которые получают быстрое применение в промышленности, привлекают к себе перспективную и энергичную молодежь.

В группе А.М.Лившица постоянно проходят практику и ведут исследования студенты и аспиранты. Некоторые из них (Н.Б.Маврин, Е.В.Горский) после окончания учебы продолжают проводить в ИСАН исследования по выбранной тематике. В 2008 г. аспирант ИСАН Е.В.Горский успешно защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Литература

1. А.М. Лившиц, А.В. Пелезнев, Особенности применения приборов с зарядовой связью в эмиссионном спектральном анализе. Заводская лаборатория, 1992, №8, сс. 23-26
2. А.М. Лившиц, А.В. Пелезнев, Малогабаритный переносной сортировщик металлических сплавов «ПАПУАС-3». Оптическая техника, 1995, №1, сс. 34-35
3. Е.В. Горский, А.М. Лившиц, А.В. Пелезнев, Учет влияния «третьих» элементов при анализе алюминиевых сплавов на эмиссионном спектрометре ПАПУАС-4, Заводская лаборатория, 2006, №3, стр. 11-15
4. Е.В. Горский, А.А. Колесников, А.М. Лившиц, А.В. Пелезнев, Рекалибровка аналитических методик на эмиссионных спектрометрах типа ПАПУАС-4, Датчики и системы, 2007, №2, стр. 27-31.
5. Е.В. Горский, А.М. Лившиц, А.В. Пелезнев, Особенности использования эмиссионного спектрометра ПАПУАС-4ИМ при анализе медных сплавов, Заводская лаборатория 2007, №5, стр. 25-27.

Сектор электронных спектров молекул



Сектор электронных спектров молекул (заведующий сектором – д.ф.-м.н. Ю.Г. Вайнер) создан в 2003 г. на базе лаборатории электронных спектров молекул. Вскоре после основания Института спектроскопии в 1969 г. был создан сектор электронных спектров молекул, который позднее был преобразован в лабораторию. С момента основания и до момента смерти в 2002 г. сектор и лабораторию возглавлял профессор Р.И. Персонов. Первыми сотрудниками сектора кроме него были к.ф.-м.н. Е.И. Альшиц и Л.А. Быковская. В настоящее время в секторе работают 11 сотрудников (из них 2 доктора наук и 3

кандидата наук). В секторе регулярно проходят обучение студенты и аспиранты Московского физико-технического института.

Одним из важнейших достижений лаборатории электронных спектров молекул явилась разработка методов "селективной спектроскопии молекул в твердых матрицах", позволяющих увеличить реальное спектральное разрешение в неупорядоченных твердотельных системах при низких температурах до 10^5 раз. Эти открытия появились в результате экспериментов по исследованию природы широких спектральных полос в примесных твердых растворах, выполненных в 1972-73 гг. В ходе этих экспериментов было обнаружено, что при достаточно низких температурах уширение таких спектров в основном имеет неоднородную природу, наблюдаемый спектр состоит из большого числа узких бесфононных линий. Было показано, что с помощью селективного лазерного возбуждения может быть выявлена тонкая структура в указанных спектрах (Р.И. Персонов, Е.И. Альшиц, Л.А. Быковская [1,2,3]). Разработанный метод получения тонкоструктурных спектров флуоресценции при селективном лазерном возбуждении стал широко использоваться для получения тонкоструктурных спектров примесных неупорядоченных твердотельных сред и получил в зарубежной литературе название: Fluorescence Line Narrowing. В ходе проведенных в то время экспериментов было впервые обнаружено (1974 г. [4]), что при монохроматическом лазерном облучении примесные молекулы могут испытывать разнообразные фотохимические и фотофизические превращения, приводящие к появлению в наблюдаемых спектрах острых провалов. На получении и анализе этих провалов был основан новый метод селективной спектроскопии, названный методом выжигания узких стабильных спектральных провалов. В международной литературе этот метод получил название Persistent Hole-Burning. Несколько позднее эффект выжигания провалов был открыт независимо в Институте физики Эстонии [5]. Метод выжигания стабильных спектральных провалов стал мощным инструментом исследования процессов спектральной релаксации в примесных твердых телах и успешно используется во многих исследовательских коллективах. С применением указанных методов в секторе, а затем лаборатории электронных спектров было выполнено большое количество



Лауреаты Государственной премии СССР 1986 г. (слева направо):
Е.И. Альшиц, Л.А. Быковская, Б.М. Харламов, Р.И. Персонов.

фундаментальных работ по селективной спектроскопии сложных примесных молекулярных систем, включая работы по изучению спектральной динамики

примесных органических стекол и полимеров. Эти работы внесли значительный вклад в понимание фундаментальных закономерностей сложных молекулярных систем и получили широкое признание у нас в стране и за рубежом. За открытие и развитие указанных методов и, в целом, направления селективной лазерной спектроскопии примесного центра Р.И.Персонов, Б.М.Харламов, Е.И.Альшиц, Л.А.Быковская в 1986 г. были удостоены Государственной премии СССР.

В настоящее время исследования, проводимые в секторе, связаны с изучением динамических процессов, протекающих в неупорядоченных твердотельных молекулярных средах при температурах ниже точки стеклования. Эти исследования основаны на развитии и применении двух относительно новых методов: метода фотонного эха и метода спектроскопии одиночных молекул. Указанные исследования начались после прихода в лабораторию Ю.Г. Вайнера (1989 г.) Был развит метод некогерентного фотонного эха (Ю.Г. Вайнер, Н.В. Груздев, 1991 г.), который стал применяться для исследований сверхбыстрых динамических процессов в примесных молекулярных системах. С 2000 г. для таких исследований стал применяться также метод спектроскопии одиночных молекул, который был усовершенствован для указанной цели (Ю.Г. Вайнер, к.ф.-м.н. А.В.Наумов). В совокупности, используемые методы позволяют получать богатую информацию, как о свойствах примесных молекул, так и о свойствах самой матрицы. В таких исследованиях проблемы молекулярной спектроскопии тесно переплетаются с проблемами спектроскопии твердого тела. В частности, одной из важных областей применения развитых в лаборатории методов является получение информации о динамических процессах в неупорядоченных твердых матрицах. Примесные молекулы в данном случае используются в качестве микроскопического спектрального зонда, внедряемого в прозрачную аморфную среду. С помощью этих методов установлены глубокие отличия динамики органических стекол от динамики кристаллов. Комплексные исследования с использованием перечисленных методов селективной спектроскопии примесных молекул позволили получить уникальные данные о динамике стекол при низких температурах.

Помимо фундаментальных исследований в секторе проводятся работы по развитию новых селективных и высокочувствительных методов люминесцентного спектрального анализа и спектральному приборостроению.

Литература

1. Персонов Р.И., Альшиц Е.И., Быковская Л.А. Возникновение тонкой структуры в спектрах флуоресценции сложных молекул при лазерном возбуждении. Письма в ЖЭТФ, 15, 609 (1972).
2. Personov R.I., Al'shits E.I., Bykovskaya L.A. The effect of the structure appearance in laser-excited fluorescence spectra of organic compounds in solid solutions. Optics Commun., 6, 169 (1972).
3. Персонов Р.И., Альшиц Е.И., Быковская Л.А., Харламов Б.М. Тонкая структура спектров люминесценции органических молекул при лазерном возбуждении и природа широких спектральных полос твердых растворов. ЖЭТФ, 65, 1825 (1973).
4. Kharlamov B.M., Personov R.I., Bykovskaya L.A. Stable "gap" in absorption of solid solutions of organic molecules by laser irradiation. Optics Commun., 12, 191 (1974).
5. Гороховский А.А., Каарли Р.К., Ребане Л.А., Выжигание провала в контуре чисто электронной линии в системах Шпольского. Письма в ЖЭТФ, 20, 474 (1974).

В исследованиях, проводившихся в секторе, можно выделить следующие основные направления.

Спектроскопия выжигания стабильных провалов

Исследования по развитию и применению метода выжигания стабильных спектральных провалов (ВП) проводились в лаборатории и секторе электронных спектров молекул вплоть до последнего времени (Р.И. Персонов, Б.М. Харламов, Е.И. Альшиц, Л.А. Быковская, Ю.В. Романовский, С.Г. Куликов, Н.И. Улицкий, О.В. Ходыкин, А.А. Горшелев). В период с 1986 г. по 1999 г. эти исследования проводились в тесном содружестве с коллегами из Байройтского университета в Германии (проф. D. Haarer, проф. J. Friedrich, R. Maier, J. Müller, G. Hannig, K. Fritsch, R. Wunderlich). Были получены уникальные результаты по исследованию процессов спектральной релаксации в органических полимерах при сверхнизких температурах в шкале времен от 10^{-5} до 10^6 с с применением метода ВП [0,2,3]. Это экспериментальные исследования неравновесной спектральной диффузии [4], в том числе спектральной диффузии, индуцированной внешним электрическим полем [5,6], обнаружение и интерпретация эффекта светоиндуцированной спектральной диффузии [7]. Разработаны критерии проверки границ применимости модели двухуровневых систем (ДУС) для описания релаксационных процессов в стеклах и экспериментально обнаружены отступления от предсказаний модели ДУС [9,10]. Общепринятое описание спектральной диффузии на основе модели ДУС обобщено на случай неравновесных релаксационных процессов. Результаты упомянутых исследований обобщены в [8].

Дальнейшие исследования динамики стекол с применением метода ВП позволили определить границу применимости модели ДУС в различных стеклах, выяснить роль “не-ДУС” релаксаций и соотнести релаксационные характеристики с физико-химической структурой изучаемых стекол. Это дало важную информацию для построения новых моделей, описывающей свойства стекол, как при низких температурах, так и вблизи температуры стеклования.

Одним из значительных достижений сектора в области спектроскопии ВП было открытие существенно непоренцевой формы провалов в аморфных матрицах [11]. Был выполнен детальный теоретический анализ наблюдаемой формы провалов, который позволил получить важную новую информацию о механизмах взаимодействия примесь-матрица и роли дисперсии параметров этого взаимодействия в формировании контура спектральных провалов [12]. Полученные результаты открыли богатые возможности исследования механизмов взаимодействия примесь-матрица в стеклах и дисперсии параметров этого взаимодействия на основе прецизионных измерений контуров спектральных линий.

Помимо перечисленных были выполнены исследования кинетики фотореакций, ответственных за механизмы ВП. В частности, разработан метод измерения кинетики ВП, исключаящий влияние неоднородного уширения [13,19]. Этот метод обеспечивает надежное измерение таких факторов, как дисперсия эффективности фотореакции, обнаружение множественных каналов фотореакции и т.д.

Одной из популярных методик изучения примесных аморфных систем стали разработанные в секторе *полевые эксперименты на провалах*. Вследствие своей малой ширины контуры провалов чрезвычайно чувствительны к внешним воздействиям, что позволяет как исследовать распределения локальных полей в матрицах, так и определять ряд параметров примесных молекул. В последние годы проводились эксперименты по исследованию влияния внешних

электрических полей на провалы в спектрах centrosymmetric молекул *H₂-фталоцианина* и его металлокомплексов в полимерных матрицах. При этом впервые в экспериментах такого рода использовались перестраиваемые диодные лазеры видимого диапазона. Был зарегистрирован слабый вклад *квадратичного эффекта Штарка* на фоне квазилинейного [14,15], а также обнаружен эффект “выхода” атома металла из плоскости молекул [16,17]. В последнее время проводились также эксперименты по изучению *орбитального эффекта Зеемана* на вырожденных S-S-переходах молекул вышеуказанного класса, начатые еще в 80-е годы. Первые результаты этих новых измерений продемонстрировали их перспективность при изучении проявления динамического эффекта Яна-Теллера и эффектов “кристаллического” поля в неупорядоченных молекулярных системах. Огромную роль в этих исследованиях сыграл Н.И. Улицкий.

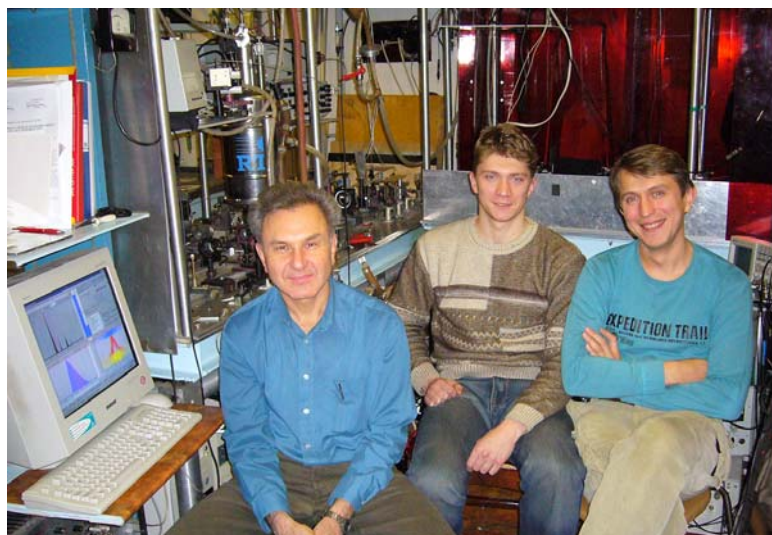
Литература

1. Maier H., Kharlamov B.M., Haarer D. Two-level system dynamics in the longtime limit: a power-law time dependence. *Phys.Rev.Lett.*, 76 (12), 2085 (1996).
2. Müller J., Haarer D., Khodykin O.V., Kharlamov B.M. Investigation of spectral diffusion in PMMA on time scales from 10^{-5} to 10^4 seconds via transient and photophysical hole burning. *Chem.Phys.*, 237, 483 (1998).
3. Müller J., Maier H., Hannig G., Khodykin O.V., Haarer D., Kharlamov B. M. Long/time scale spectral diffusion in polymer glass. *J. Chem. Phys.*, 113 (2), 876 (2000).
4. Fritsch K., Friedrich J., Kharlamov B.M. Non-equilibrium phenomena in spectral diffusion physics of organic glasses. *J.Chem.Phys.*, 105, 1798 (1996).
5. Maier H., Wunderlich R., Haarer D., Kharlamov B.M., Kulikov S.G.. Optical Detection of Electric Two Level System Dipoles in a Polymeric Glass. *Phys.Rev.Lett.*, 74, 5252 (1995).
6. Wunderlich R., Maier H., Haarer D., Kharlamov B.M. Optical investigation of low-temperature electric-field-induced relaxations in amorphous solids. *J. Phys. Chem. B*, 102 (50), 10150 (1998).
7. Wunderlich R., Maier H., Haarer D., Kharlamov B.M.. Light-induced spectral diffusion in heavily doped polymers. *Phys. Rev. B*, 75, 1 (1997).
8. Maier H., Kharlamov B.M., Haarer D. Investigation of tunneling dynamics by optical hole-burning spectroscopy, in: “Tunneling Systems in Amorphous and Crystalline solids”, ed. by P.Esquinazy, (Springer, Berlin). 1988.
9. Müller J., Haarer D., Khodykin O.V., Kharlamov B.M. Long-time scale spectral diffusion in PMMA: Beyond the TLS model? *Phys. Lett. A*, 255, 331 (1999).
10. Харламов Б.М. Исследование релаксационных процессов в органических стеклах при низких температурах методом спектроскопии выжигания провалов. Проверка границ применимости модели двухуровневых систем. *Оптика и Спектроскопия*, 91, 490 (2001).
11. Müller J., Haarer D., Kharlamov B.M. Non-lorentzian hole profiles in organic glasses caused by a distribution of optical line widths. *Phys. Lett. A*, 281, 64 (2001).
12. Kharlamov B.M., Zumofen G. Non-Lorentzian spectral diffusion line shapes in glasses: Analysis based on the two-level-system model. *J. Chem. Phys.*, 116, 5107 (2002).
13. Gorshchev A., Snegirev E.P., Ulitsky N.I., Kharlamov B.M. Broadband hole burning: a new technique for the measurement of hole burning kinetics, removing the influence of inhomogeneous broadening. *Chem. Phys.*, 285, 289 (2002).
14. Снегирев Е.П., Улицкий Н.И., Ходыкин О.В., Персонов Р.И. Нелинейный штарк-эффект на провалах в спектре Zn-фталоцианина в полимерных пленках. *Оптика и спектроскопия*, 84 (1), 47 (1998).

15. Ulitsky N.I., Snegirev E.P., Khodykin O.V., Personov R.I. Diode laser stark spectroscopy on the persistent holes. *Spectrochimica Acta Part A*, 55 (10), 2015 (1999).
16. Altmann R.B., Haarer D., Ulitsky N.I., Personov R.I. Matrix-induced and permanent dipole moment of Zn-octaethylporphin in polyvinylbutyral. *J. Lumin.*, 56, 135 (1993).
17. Улицкий Н.И., Снегирев Е.П., Персонов Р.И. Эффект Штарка на провалах в спектрах поглощения фталоцианина и его комплекса с алюминием в полимерных матрицах. *Оптика и спектроскопия*, 92 (6), 931 (2002).
18. Улицкий Н.И., Нижанковский В.И., Эффект Зеемана на провалах в Q-полосах в спектрах поглощения молекул металлокомплексов фталоцианина в аморфных полимерных стеклах, *Оптика и спектроскопия*, 98 (5), 857 (2005).
19. Горшелев А.А., Улицкий Н.И., Снегирев Е.П., Харламов Б.М., Применение метода выжигания широкого провала для исследования низкотемпературных фотореакций в примесных аморфных телах, *Оптика и спектроскопия*, 98 (5), 837 (2005).

Фотонное эхо

Исследования по спектроскопии примесных неупорядоченных твердотельных систем методом фотонного эха (ФЭ) были начаты в лаборатории электронных спектров в 1990 году. Интерес к этому методу был вызван тем, что с его помощью можно проводить исследования сверхтонкой структуры неоднородно уширенных спектров и изучать процессы быстрой фазовой релаксации. Исследования такого рода стали возможны в результате разработки (Ю.Г. Вайнер, 1989-1990 гг.) методики низкотемпературных измерений времен оптической дефазировки и быстрой спектральной диффузии в примесных стеклах методом некогерентного фотонного эха (НФЭ) и создания экспериментальной установки НФЭ.



Сотрудники сектора электронных молекул (слева-направо):
Ю.Г. Вайнер, И.Ю. Еремчев и А.В. Наумов за работой
на установке некогерентного фотонного эха.

Существенным преимуществом этой разновидности ФЭ является возможность реализации сверхвысокого (вплоть до фемтосекунд) временного разрешения без применения фемтосекундных лазеров. Достигнутое на созданной в секторе установке временное разрешение в 25-30 фс позволило приступить к уникальным систематическим исследованиям сверхбыстрых процессов спектральной релаксации в примесных органических стеклах и полимерах. Уже первые

измерения на созданной установке привели к обнаружению (одновременно с группой американских исследователей (L.R. Narasimhan et al, Chem. Phys. Lett. v.176, N3,4 (1991)) в примесных низкотемпературных стеклах спектральной диффузии в наносекундном диапазоне времен [1-3], важному для понимания природы элементарных низкочастотных возбуждений в стеклах экспериментальному факту.

За прошедшие годы в секторе было выполнено большое количество работ по исследованию процессов фазовой релаксации в примесных аморфных молекулярных системах с применением метода НФЭ (Ю.Г. Вайнер, Н.В. Груздев, Р.И. Персонов, к.ф.-м.н. М.А. Кольченко, А.В. Наумов).

Реализация ультравысокого временного разрешения позволила существенно повысить температурный диапазон измерений времен оптической дефазировки в изучаемых системах методом ФЭ (вплоть до 100 K и выше). Это сделало возможным, в частности, впервые наблюдать вклады в дефазировку в примесных аморфных средах, соответствующие бесфононной линии хромофорных молекул, в столь широком диапазоне температур и отделить этот вклад от вклада фононного крыла (см. Рис. 1).

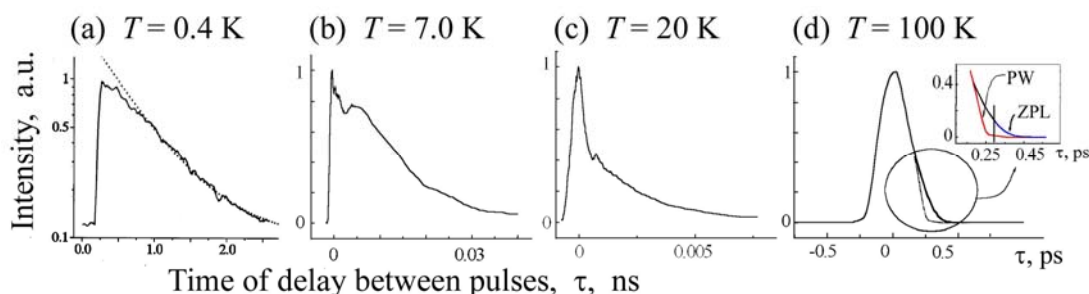


Рис. 1. Кривые спада двухимпульсного пикосекундного фотонного эха (a) и некогерентного фотонного эха (b-d) для системы *цинк-октаэтилпорфин* в *толуоле*. Пунктирная линия на (a) соответствует аппроксимирующей экспоненциальной зависимости, используемой для определения времени оптической дефазировки, T_2 . Вставка на (d) демонстрирует разделение участков кривой спада, соответствующих бесфононной линии (ZPL) и фононному крылу (PW).

Начиная с 1992 г., установилось плодотворное сотрудничество с учеными из Байройтского университета по развитию и применению метода ФЭ для исследований динамических процессов в неупорядоченных средах (Германия, проф. D. Haarer, доктор S. Zilker). С участием Ю.Г. Вайнера в Байройтском университете была создана уникальная экспериментальная установка двухимпульсного ФЭ, оснащенная оптическим криостатом на He-3. На созданной установке стало впервые возможным проводить измерения процессов оптической дефазировки в примесных системах при температурах вплоть до 350 mK. Совместные измерения одних и тех же систем на установке НФЭ в Институте спектроскопии и установке 2ФЭ в Байройтском университете сделали возможными уникальные исследования процессов оптической дефазировки в примесных неупорядоченных твердотельных средах в чрезвычайно широком для таких исследований диапазоне температур (от 0,35 K до 100 K) и получить уникальную информацию о релаксационных процессах в органических стеклах и полимерах в указанном температурном диапазоне [4-10] (см. Рис. 2). Эти измерения позволили, в частности, впервые определить температуры, при которых начинает проявляться вклад в оптическую дефазировку, связанный с взаимодействием молекул примеси с квазилокализованными низкочастотными колебательными модами аморфной матрицы в изучаемых системах [3-5]. В ходе этих измерений был впервые обнаружен эффект дисперсии времен оптической

дефазировки в примесной аморфной системе: *тетра-tert-бутилтеррилен* в *полиизобутилене* [7,8]. Анализ зависимости времен дефазировки от температуры в изучаемых системах обнаружил также отличие низкотемпературной части этой зависимости от предсказаний теории на основе стандартной модели низкотемпературных стекол.

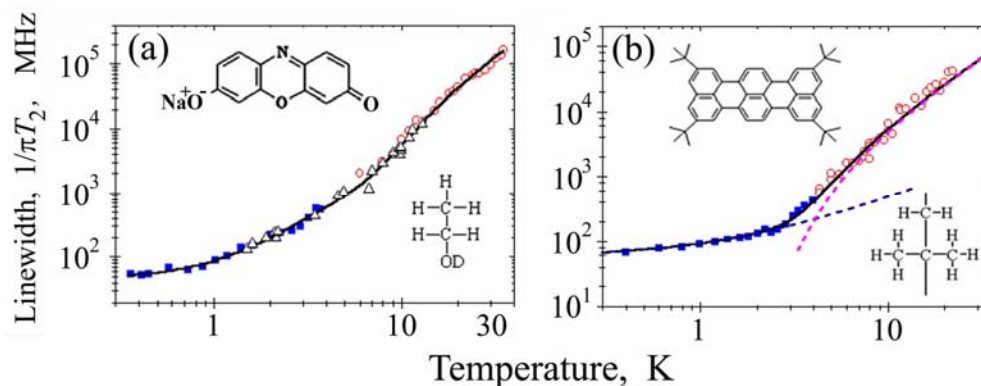


Рис. 2. Температурные зависимости обратного времени оптической дефазировки, $\Gamma_{\text{ФЭ}} = 1/\pi T_2$, (которую можно рассматривать как величину эквивалентную однородной ширине линии) для двух систем: – *резорурфин* в *d-этаноле* (а) и *тетра-tert-бутилтеррилен* в *полиизобутилене* (б), – измеренные методами двухимпульсного фотонного эха – (квадраты) и некогерентного фотонного эха – (кружки). На (а) *треугольниками* показаны результаты независимых измерений выполненных в [M. Berg et al., J. Chem. Phys., 88, 1564 (1988)]. На (б) *штриховыми линиями* показаны вклады в ширину линии от взаимодействия примеси с двухуровневыми системами и квазилокальными низкочастотными модами матрицы, преобладающие, соответственно, при низких и высоких температурах.

Численный анализ полученных данных и объяснение обнаруженного несогласия с предсказаниями существующих теорий потребовал совершенствования существующих теоретических моделей. Была разработана и апробирована модифицированная модель ФЭ в низкотемпературных стеклах (А.В. Наумов, Ю.Г. Вайнер) [11,12]. Новая модель позволяет учитывать разнообразные микроскопические особенности взаимодействия примесных молекул с ДУС (например, наличие минимального расстояния между хромофорами и ДУС, дисперсию значений константы взаимодействия примесь-ДУС, изменение свойств матрицы вблизи ионных хромофорных молекул и т.п.). Для проверки применимости модели мягких потенциалов к описанию процессов оптической дефазировки в аморфных средах разработана методика расчетов ширин линий в таких средах в рамках модели мягких потенциалов (Ю.Г. Вайнер, М.А. Кольченко) [13,14]. Показано, что модель мягких потенциалов качественно правильно описывает температурное поведение однородной ширины бесфононной линии в относительно широком температурном диапазоне и может быть с успехом использована в спектральных исследованиях.

В последние годы были проведены совместные с учеными Калифорнийского Университета (США, Калифорния, проф. E.L. Chronister) исследования низкотемпературной динамики органических стекол и полимеров с применением метода двухимпульсного пикосекундного ФЭ при высоких давлениях (М.А. Кольченко). Проведенные исследования позволили оценить влияние различных механизмов однородного уширения бесфононной линии при высоких давлениях [18].

Литература

1. Gruzdev N.V., Sil'kis E.G., Titov V.D., Vainer Yu.G. Photon echo study of ultrafast dephasing in amorphous solids in wide temperature region with incoherent light. **J. De Physique IV**, C7, 439 (1991).
2. Gruzdev N.V., Sil'kis E.G., Titov V.D., Vainer Yu.G. Ultrafast dephasing of resorufin in d-ethanol glass from 1.7 to 40 K studied by incoherent photon echo. **JOSA B**, 9 (6), 941 (1992).
3. Gruzdev N.V., Vainer Yu.G. Nanosecond spectral diffusion and optical dephasing in organic glasses over a wide temperature-range - incoherent photon-echo study of resorufin in d- and d6-ethanol. **J. Lumin.**, 56 (1-6), 2181 (1993).
4. Zilker S.J., Vainer Yu.G., Haarer D. Line broadening mechanisms in spectra of organic amorphous solids: photon echo study of terrylene in polyisobutylene at subkelvin temperatures. **Chem. Phys. Lett.**, 273, 232 (1997).
5. Zilker S.J., Friebel J., Haarer D., Vainer Yu.G., Personov R.I. Investigation of low temperature linebroadening mechanisms in organic amorphous solids by photon echo, hole-burning and single molecule spectroscopy. **Chem. Phys. Lett.**, 289, 553 (1998).
6. Zilker S.J., Haarer D., Vainer Yu.G., Personov R.I. Temperature-dependent line broadening of chromophores in amorphous solids: differences between single-molecule spectroscopy and photon echo results. **J. Lumin.**, 76/77, 157 (1998).
7. Zilker S.J., Kador L., Friebel J., Vainer Yu.G., Kol'chenko M.A., Personov R.I. Comparison of photon echo, hole burning, and single molecule spectroscopy data on low-temperature dynamics of organic amorphous solids. **J. Chem. Phys.**, 109 (16), 6780 (1998).
8. Vainer Yu.G., Kol'chenko M.A., Naumov A.V., Personov R.I., Zilker S.J. Photon echoes in doped organic amorphous systems over a wide (0.35-50K) temperature range. **J. Lumin.**, 86, 265 (2000).
9. Vainer Yu.G., Kol'chenko M.A., Naumov A.V., Personov R.I., Zilker S.J., Haarer D.. Optical dephasing in doped organic glasses over a wide (0.35-100 K) temperature range: solid toluene doped with Zn-octaethylporphine. **J. Chem. Phys.**, 116 (20), 8959 (2002).
10. Вайнер Ю.Г., Кольченко М.А., Наумов А.В., Персонов Р.И., Цилкер С.Дж. Оптическая дефазировка в твердом толуоле, активированном цинк-октаэтилпорфином. **ФТТ**, 45 (2), 215 (2003).
11. Vainer Yu.G., Personov R.I., Zilker S.J., et al. Contributions of the different line broadening mechanisms in photon echoes and single molecule spectra in amorphous solids. **Mol. Cryst. Liq. Cryst.** A291, 251 (1996).
12. Вайнер Ю.Г., Персонов Р.И. Фотонное эхо в аморфных средах в условиях значительной дисперсии однородных ширин линий примесных центров. **Оптика и Спектроскопия**, 79 (5), 2824 (1995).
13. Naumov A.V., Vainer Yu.G.. Modified model of photon echoes in low-temperature glasses: Effect of minimal distance between two-level systems and chromophore. **J. Phys. Chem. B**, 107 (9), 2054 (2003).
14. Naumov A.V., Vainer Yu.G.. Minimal distance between chromophore and two-level systems in amorphous solids: effect on photon echo and single molecule spectroscopy data. **J. Lumin.**, 98 (1-4), 63 (2002).
15. Вайнер Ю.Г., Кольченко М.А., Персонов Р.И. Модель мягких потенциалов и однородная ширина спектральных линий примесных центров в молекулярных аморфных средах. **ЖЭТФ**, 92 (4), 643 (2001).
16. Kol'chenko M.A., Vainer Yu.G., Personov R.I. Optical dephasing in polymers and the soft-potential model: Analysis of photon echo in doped PMMA. **J. Lumin.**, 98 (1-4), 375 (2002).

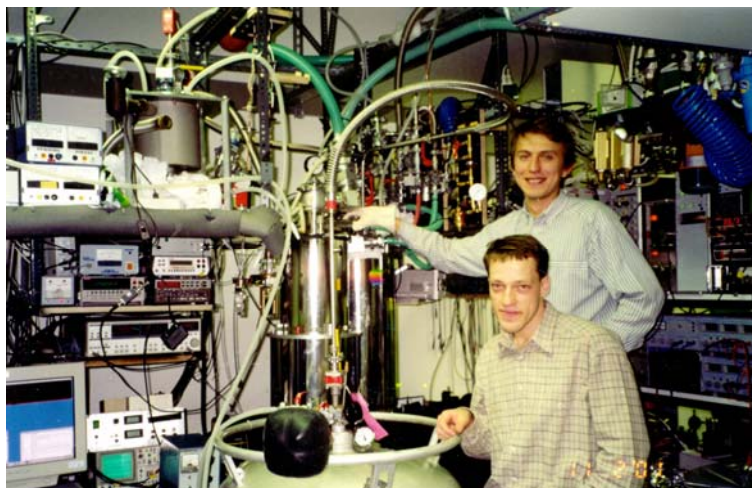
17. Yu.G. Vainer, A.V. Naumov, M. Kol'chenko, R.I. Personov, The quasi-localized low-frequency vibrational modes of disordered solids: I. Study by photon echo, *Phys. Stat. Sol. B*, v.241, N 15, pp.3480-3486 (2004).

18. M.J. McIntire, M. Yamaguchi, M.A. Kol'chenko, Yu.G. Vainer, E.L. Chronister, "High-pressure studies of optical dephasing in polymer glasses", *J. Phys. Chem. B*, 110, 227 (2006).

Спектроскопия одиночных молекул

1. Исследование низкотемпературной динамики неупорядоченных твердотельных сред

Это направление исследований стало развиваться сотрудниками сектора электронных спектров молекул (Ю.Г.Вайнер, А.В.Наумов) сравнительно недавно - с конца 2000 г. – и в настоящее время является одним из основных направлений в деятельности сектора. Перспективность использования спектроскопии одиночных молекул (СОМ) для исследований динамики аморфных сред связана с тем, что этот метод дает информацию о параметрах и динамике микроскопического окружения примесной молекулы, неискаженную усреднением по ансамблю примесных молекул, как это имеет место при измерениях традиционными методами. Так, например, именно эксперименты по СОМ в аморфных полимерах, в ходе которых наблюдались прыжки спектральных линий примесных одиночных молекул, позволили получить первое прямое доказательство того, что при низких температурах в неупорядоченных средах существуют туннелирующие двухуровневые системы, которые и вызывают наблюдаемые прыжки спектральных линий.



Установка для измерения спектров одиночных молекул. (На переднем плане Маркус Бауэр - аспирант кафедры «Экспериментальная физика IV» Байройтского университета, Германия; на заднем плане А.В.Наумов – старший научный сотрудник Института спектроскопии РАН).

Особенностью спектров одиночных примесных молекул (ОМ) в низкотемпературных неупорядоченных твердотельных матрицах является их сложная структура и изменение параметров со временем (см. Рис. 1). Это связано со случайным характером локальной динамики неупорядоченных сред и непрерывными изменениями ее параметров.

Из представленного рисунка видно, что спектры ОМ могут иметь не только сложную асимметричную форму, но и состоять из нескольких спектральных пиков. Возникает ряд принципиальных вопросов: Как извлекать из случайных по своей природе и очень индивидуальных спектров ОМ в стеклах информацию об общих

динамических свойствах стеклянной матрицы? Как адекватно характеризовать такие сложные по форме спектры? Каковы статистические свойства спектров ОМ?

В секторе развит новый подход к использованию метода СОМ для исследований динамики низкотемпературных стекол, который позволил преодолеть указанные проблемы [1, 2] и, тем самым, открыть возможности для широкого применения метода СОМ при исследованиях примесных аморфных систем.

Основная идея разрабатываемого подхода заключается в измерении большого числа спектров ОМ и последующей их статистической обработке. Алгоритм усреднения в таком подходе может выбираться в зависимости от условий решаемой задачи, что позволяет сохранить в процессе обработки ту информацию о динамике исследуемой системы, которая вызывает интерес. Это принципиально отличает данный подход от традиционных спектроскопических методов исследования спектров примесных молекул, используемых при исследованиях примесных стекол, таких как методы ФЭ и ВП. В ходе ансамблевого усреднения, присущего таким методам, часть информации о спектральной динамике примесных систем безвозвратно теряется. Так, например, в методе ВП суммарная форма линий получается лоренцевой и информация об индивидуальной асимметрии спектров примесных молекул пропадает, тогда как при усреднении параметров спектральных линий ОМ, выполненных расчетным путем, уже после измерения этих параметров, указанную информацию можно сохранить.

Для решения проблемы идентификации сложных по форме спектров ОМ, регистрируемых в ходе экспериментов, была разработана специальная методика их детектирования. Она заключалась в относительно быстрой (по сравнению с общим временем накопления сигналов) многократной регистрации спектров возбуждения флуоресценции в выбранном спектральном интервале и

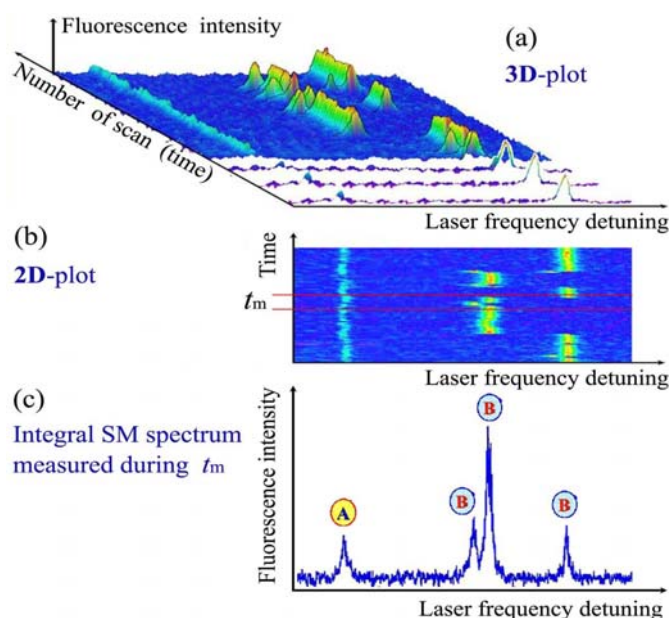


Рис. 1. Пример временной эволюции спектров одиночных молекул *тетра-tert-бутилтеррилена* в *полиизобутилене* регистрируемых многократно при $T = 2$ K (a,b). Результаты измерений представлены в виде трехмерной (3D-plot) и двухмерной (2D-plot) картинок, (a) и (b), соответственно.

последующем анализе временного поведения зарегистрированных спектров. Суть этой методики продемонстрирована на Рис. 1 [1, 2]. Цветовая гамма точек на (a) и (b) поставлена в соответствие с интенсивностью флуоресценции. Спектр молекулы А не испытывает заметных прыжков за время наблюдения. Спектр молекулы В испытывает «прыжки» между 4-мя спектральными положениями (взаимодействие с двумя «сильно взаимодействующими» двухуровневыми системами). Результирующий интегральный спектр (c), соответствует сумме всех спектров в выбранном временном интервале в 120 с, показанном на (b) сплошными горизонтальными линиями. Легко видеть, что суммарный спектр соответствует двум молекулам:

молекуле А (синглет) и молекуле В (триплет).

Для адекватного описания сложных контуров спектров ОМ было предложено использовать хорошо известную концепцию моментов распределений [1, 2]. Использование моментов позволяет корректно учитывать все детали сложного спектрального контура, включая процессы уширения спектральных линий и их расщепления. Введение понятия моментов (а также производных от них функций - кумулянтов) облегчило также поиск тех общих статистических закономерностей, которым подчиняются индивидуальные спектры одиночных примесных молекул в низкотемпературных стеклах. Совместно с сотрудниками Массачусетского технологического института (E. Barkai, R. Silbey, Кэмбридж, США) было показано теоретически и продемонстрировано экспериментально, что такие спектры подчиняются статистике Леви (обобщенной статистике Гаусса) [3].

С использованием развитого подхода совместно с группой проф. L. Kador (Байройтский университет, Германия) был проведен цикл исследований по изучению низкотемпературной динамики примесных аморфных сред на примере системы: *тетра-терт-бутилтеррилен* в *полиизобутилене*. Получена уникальная информация о процессах оптической дефазировки и спектральной диффузии в изучаемой системе на микроскопическом уровне. В частности, оценен минимальный радиус взаимодействия примесь-ДУС в исследованной системе [3, 4, 6]; определены распределения частотных сдвигов, асимметрии и обобщенной ширины индивидуальных спектров ОМ в изучаемой системе [1, 2]; впервые на микроуровне разделены вклады туннелирующих ДУС и квазилокальных низкочастотных колебательных возбуждений матрицы в процессы уширения спектральных линий примесных центров [8].

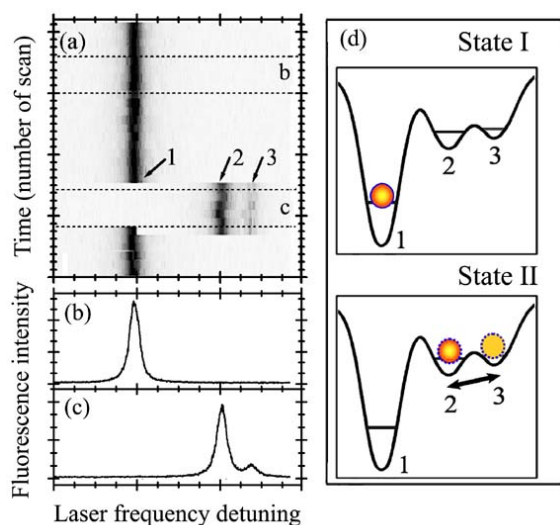


Рис. 2. (а) Пример спектральной траектории одной из ОМ, измеренной при $T = 4.5$ К и (b,c) полученные интегральные спектры. Соответствующие временные интервалы (60 с) изображены на (а) пунктирными линиями. (d) Схема трехуровневой системы, «сильное взаимодействие» хромофора с которой позволяет объяснить временную эволюцию спектра ОМ.

Принципиально важным преимуществом метода СОМ является возможность прямого экспериментального исследования механизмов взаимодействия примесных молекул с элементарными низкочастотными возбуждениями неупорядоченных твердотельных сред. Так, например, анализ временной эволюции индивидуальных спектров ОМ позволил впервые выявить примеры поведения спектров ОМ, которые не укладываются в рамки современных представлений о природе низкотемпературных стекол [1, 8]. В частности, результаты некоторых наблюдений могут быть интерпретированы как результат взаимодействия примесной молекулы с «трехуровневыми» системами (Рис. 2), а

временная эволюция некоторых спектров ОМ может быть интерпретирована как непосредственное наблюдение взаимодействия ДУС между собой. Таким образом, исследования с применением СОМ, начатые в секторе, позволяют пролить свет на фундаментальные вопросы, связанные с динамикой неупорядоченных конденсированных сред.

В последние годы был разработан новый подход к получению информации о локальных параметрах колебательных возбуждений в неупорядоченных твердотельных средах при низких и промежуточных температурах ($1.6 < T < 30-40$ K). Развитый подход основан на измерениях индивидуальных температурных зависимостей ширин линий в оптических спектрах примесных одиночных хромофорных молекул, внедряемых в изучаемую среду в качестве спектрального нанозонда. Последующий анализ полученных температурных зависимостей позволяет определить значения локальных частот колебательных мод в нанокрестности изучаемых молекул. Это позволяет получать микроскопическую информацию о динамических процессах в изучаемой системе, неискаженную ансамблевым усреднением и одновременно отражающую общие свойства этой системы.

С использованием развитого подхода проведены исследования процессов уширения спектральных линий в спектрах примесных молекул *тетра-tert-бутилтеррилена*, внедренных в аморфный *полиизобутилен*. Температурная зависимость ширины спектральной линии, измеренная для одной из наблюдаемых примесных молекул, приведена на Рис. 3. Анализ полученных зависимостей позволил определить значения локальной частоты колебательных мод и коэффициента связи хромофор-мода в нанокрестности наблюдаемых хромофорных молекул в изучаемой системе. Обнаружена значительная дисперсия указанных параметров, что ясно указывает на локальный характер колебательных мод, вызывающих уширение в оптических спектрах примесных хромофорных молекул.

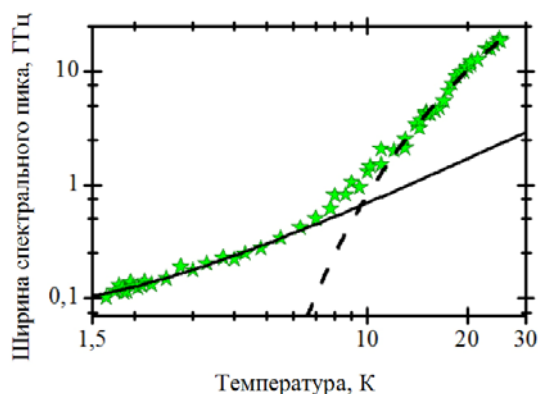


Рис. 3. Пример измеренной зависимости ширины спектральной линии от температуры в спектре одной из молекул тетра-tert-бутилтеррилена, внедренной в полиизобутилен, (звездочки). Линии показывают вклады двухуровневых систем и квазилокальных колебательных мод в общую дефазировку, аппроксимированные степенной (сплошная линия) и квазиэкспоненциальной (штрих-пунктирная линия) зависимостями.

На основании полученных экспериментальных данных была определена плотность состояний локальных колебательных возбуждений в изучаемой системе. Вид полученного колебательного спектра показан на Рис. 4. На этом же рисунке приведена для сравнения форма бозонного пика, измеренного в чистом (без примесей) полиизобутилене, методом неупругого нейтронного рассеяния. Оба спектра нормированы на бозон фактор и фактор $g(\omega)/\omega^2$, где $g(\omega)$ плотность состояний. Пунктирная линия показывает вклад акустических фононов, предсказываемый моделью Дебая.

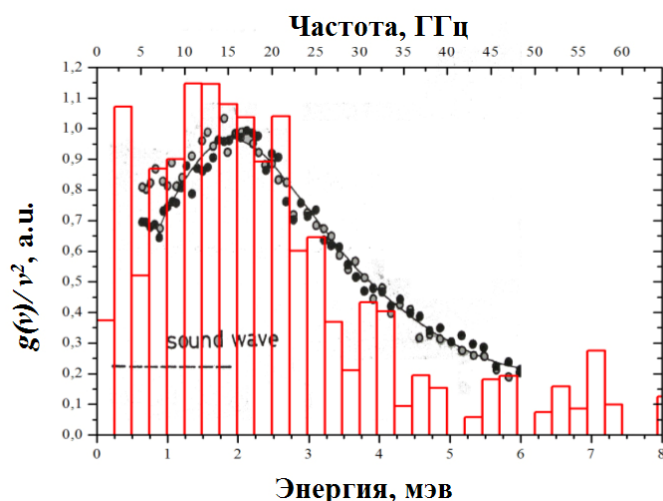


Рис. 4. Энергетический спектр локализованных колебаний в аморфном полиизобутилене, допированном хромофорными молекулами тетра-терт-бутилтеррилена, и бозонный пик в полиизобутилене без примесей (кружки), измеренные двумя различными методами: (1) методом спектроскопии одиночных молекул, который дает индивидуальные значения частот квазилокальных низкочастотных колебательных мод в нанокрестности изучаемых молекул (*гистограмма*), и (2) методом неупругого нейтронного рассеяния, который дает усредненные по ансамблю возбуждений данные о плотности их колебательных состояний (*кружки и сплошная линия*).

Совпадение формы измеренного энергетического спектра колебательных мод и бозонного пика, измеренного в чистом полимере, свидетельствует о том, что:

1) Микроскопическая природа колебаний, которые вызывают уширение спектральных линий примесных хромофорных молекул, и колебаний, которые ответственны за появление бозонного пика в матрице без примеси, одна и та же.

2) Введение хромофорной молекулы в полимерную органическую аморфную матрицу не вызывает заметного изменения наблюдаемой при низких и промежуточных температурах колебательной динамики матрицы.

Литература

1. Naumov A.V., Vainer Yu.G., Bauer M., Zilker S.J., Kador L. Distributions of moments of single-molecule spectral lines and the dynamics of amorphous solids. *Phys. Rev. B*, 63, art. no. 212302 (2001).
2. Naumov A.V., Vainer Yu.G., Bauer M., Kador L. Moments of single molecule spectral lines in low temperature glasses: measurements and model calculations. *J. Chem. Phys.*, 116, 8132 (2002).
3. Barkai E., Naumov A.V., Vainer Yu.G., Bauer M., Kador L. Levy Statistics for Random Single-Molecule Line Shapes in a Glass. *Phys. Rev. Lett.*, 91 (7), art. no. 075502 (2003).
4. Naumov A.V., Vainer Yu.G. Minimal distance between chromophore and two-level systems in amorphous solids: effect on photon echo and single molecule spectroscopy data. *J. Lumin.*, 98 (1-4), 63 (2002).
5. Вайнер Ю.Г., Наумов А.В., Bauer M., Kador L. Динамика аморфных полимеров при низких температурах и временная эволюция спектров одиночных примесных молекул: I. Эксперимент. *Оптика и Спектроскопия*. 94 (6), 926 (2003).
6. Вайнер Ю.Г., Наумов А.В., Bauer M., Kador L. Динамика аморфных полимеров при низких температурах и временная эволюция спектров одиночных примесных молекул: II. Модельные расчеты и анализ результатов. *Оптика и Спектроскопия*. 94 (6), 937 (2003).

7. Vainer Yu.G., Naumov A.V., Bauer M., Kador L. Dynamics of a doped polymer at temperatures where the two-level system model of glasses fails: study by single-molecule spectroscopy. **J. Chem. Phys.**, 119, (13), 6296 (2003).
8. Bauer M., Kador L., Vainer Yu.G., Naumov A.V. Thermal activation of two-level systems in a polymer glass as studied with single-molecule spectroscopy. **J. Chem. Phys.**, 119 (7), 3836 (2003).
9. A.V. Naumov, Yu.G. Vainer, M. Bauer, L.Kador, Quasi-localized low-frequency vibrational modes of disordered solids II. Study by single-molecule spectroscopy, **Phys. Stat. Sol. B**, v.241, N 15, pp.3487-3492 (2004).
10. Ю.Г. Вайнер, А.В. Наумов, М. Bauer, L.Kador, Е.Бarkai, «Статистический анализ спектров примесных одиночных молекул и динамика неупорядоченных твердых тел. I. Распределения ширин, моментов и кумулянтов», **Оптика и спектроскопия**, том 98, № 5, сс. 806-813 (2005).
11. Ю.Г. Вайнер, А.В. Наумов, «Статистический анализ спектров примесных одиночных молекул и динамика неупорядоченных твердых тел. II. Проявление взаимодействия двухуровневых систем с примесными молекулами в зависимости от расстояния между ними», **Оптика и спектроскопия**, том 98, № 5, сс. 814-819 (2005).
12. Yu.G.Vainer, A.V. Naumov, M. Bauer, L. Kador, "Dispersion of the local parameters of quasilocized low-frequency vibrational modes in a low-temperature glass: Direct observation via single-molecule spectroscopy", **J. Chem. Phys.**, v. 122, No 24, pp. 244705 (2005).
13. A.V. Naumov, Yu.G.Vainer, M. Bauer, L. Kador, «Applications of laser techniques for the study of dynamics of amorphous solids with high spatial resolution: single molecule spectroscopy», **OSA Trends in Optics and Photonics Series**, v. 98, p. WB11 (2005).
14. Наумов А.В., Вайнер Ю.Г., "Параметры квазилокальных низкочастотных колебательных мод в стеклах: Измерения методами фотонного эха и спектроскопии одиночных молекул", **Известия РАН (серия физическая)**, т. 70, № 4, сс. 470-473 (2006).
15. Yu.G. Vainer, A.V. Naumov, M. Bauer, L. Kador, "Experimental evidence of the local character of vibrations constituting the boson peak in amorphous solids", **Phys. Rev. Lett.**, v. 97, No 18, pp. 185501 (2006).

2. Использование одиночных молекул в качестве нанозондов для молекулярной электроники

Развитие нанотехнологий и создание на их основе новых материалов и приборов требуют разработки эффективных методов контроля свойств и параметров нанообъектов и наноструктур. Существующие методы такого контроля (например, методы сканирующей туннельной микроскопии, электронной микроскопии и микроскопии ближнего поля) обладают целым рядом принципиальных недостатков, которые делают указанный контроль недостаточно информативным, а во многих случаях неосуществимым. В большинстве из этих методов получаются лишь данные о размерах и форме изучаемых объектов, тогда как информация об основных свойствах этих объектов и происходящих в них процессах в этих данных отсутствует. Очень часто получаемые данные носят усредненный по большому ансамблю контролируемых объектов характер и не отражают индивидуальные характеристики таких объектов. Во многих случаях используемые для диагностики нанообъектов приборы и инструменты оказывают нежелательное сильное воздействие на контролируемую среду, что может приводить к неприемлемым ошибкам.

Метод спектроскопии одиночных молекул лишен большинства перечисленных недостатков. По существу, примесные хромофорные молекулы можно рассматривать как уникальный наноинструмент (нанотермометр, нановольтметр, наноамперметр, и т.п.) для изучения локальных параметров твердотельной среды.

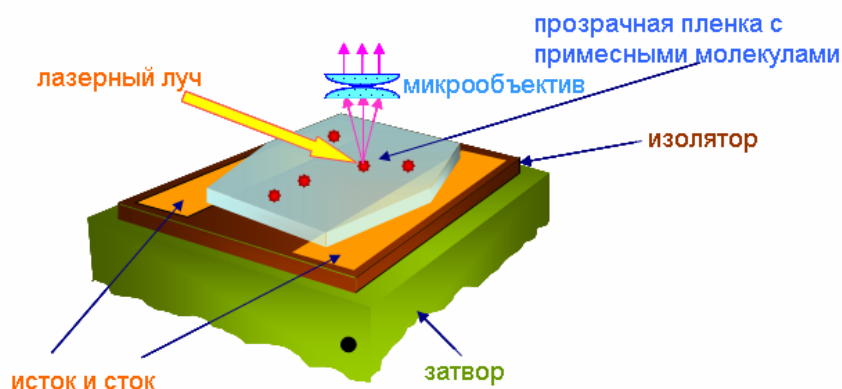


Рис. 1. Измерение локальных токов в микротранзисторе с использованием хромофорных молекул в качестве наноамперметра.

В последнее время в секторе электронных спектров (к.ф.-м.н. М.А. Кольченко) совместно с Лейденским университетом (Нидерланды, проф. М. Оррит) начаты исследования, ставящие целью применение метода спектроскопии одиночных молекул для диагностики элементов молекулярной электроники. В частности, начаты работы по использованию одиночных молекул для измерения локальных токов и напряжений в органических полевых микротранзисторах. Для реализации этой цели на микротранзисторную структуру наносится тонкая (толщиной в сотни нм) пленка из органического кристалла с внедренными в него в малой концентрации хромофорными молекулами, спектры которых содержат информацию об электрических и магнитных полях в изучаемой транзисторной структуре (см. Рис. 1).

В ходе начатых работ была развита необходимая инфраструктура, разработана технология приготовления микроструктур (органических полевых микротранзисторов). Были выполнены спектроскопические исследования ряда примесных органических систем с целью выбора оптимальной системы для изучения молекулярной проводимости методом спектроскопии одиночных молекул. В ходе этих исследований было впервые обнаружено и изучено влияние межмолекулярной интеркомбинационной конверсии на спектры одиночных молекул в ряде кристаллических матриц. Показано, что это явление накладывает серьезные ограничения на выбор системы примесь-матрица для использования в экспериментах по спектроскопии одиночных молекул.

Проведены измерения распределения пространственного заряда внутри микротранзистора. Для этого было изучено влияние электрических параметров транзистора (напряжение затвора и напряжения исток-сток) на спектры одиночных молекул, внедренных в транзистор в качестве нанозондов. Обнаружено значительное влияние одиночных зарядов, протекающих в непосредственной близости от молекулы-зонда, на ее наблюдаемый спектр. Обнаружено резонансное увеличение величины штарковского расщепления линий одиночных хромофоров при приложении к электродам транзистора переменного

электрического напряжения в диапазоне 50 кГц–3 МГц, связанное с возбуждением низкочастотных колебаний кристаллической решетки.

Литература

1. A.A.L. Nicolet, P. Bordat, C. Hofmann, M.A. Kol'chenko, B. Kozankiewicz, R. Brown, and M. Orrit, Single dibenzoterrylene molecules in an anthracene crystal. Main insertion sites. **Chem. Phys. Chem.** 8, 13, 1929-1936 (2007).
2. A.A.L. Nicolet, C. Hofmann, M.A. Kol'chenko, B. Kozankiewicz, and M. Orrit Single dibenzoterrylene molecules in an anthracene crystal: Spectroscopy and photophysics. **Chem. Phys. Chem.** 8, 8, 1215-1220 (2007).
3. A. Nicolet, M.A. Kol'chenko, B. Kozankiewicz, and M. Orrit Intermolecular inter-system-crossing in single molecule spectroscopy: Terrylene in anthracene crystal. **J. Chem. Phys.** 124, 16, 164711 (2006).
4. C. Hofmann, A. Nicolet, M.A. Kol'chenko, M. Orrit. Towards nanoprobe for conduction in molecular crystals: dibenzoterrylene in anthracene crystals. **Chem. Phys.** 318, 1-6 (2005).
5. M.A. Kol'chenko, B. Kozankiewicz, A. Nicolet, and M. Orrit Intersystem crossing mechanisms and single-molecule fluorescence. Terrylene in anthracene crystals. **Оптика и спектроскопия**, 98, 5, 745-751 (2005).

3. Люминесцентный микроскоп для нанодиагностики твердых сред

В самое последнее время сотрудниками сектора (А.В. Наумов, Ю.Г. Вайнер, А.А. Горшелев, И.Ю. Еремчев) разрабатывается оригинальный подход к измерению спектров одиночных примесных молекул с использованием схемы люминесцентного микроскопа.

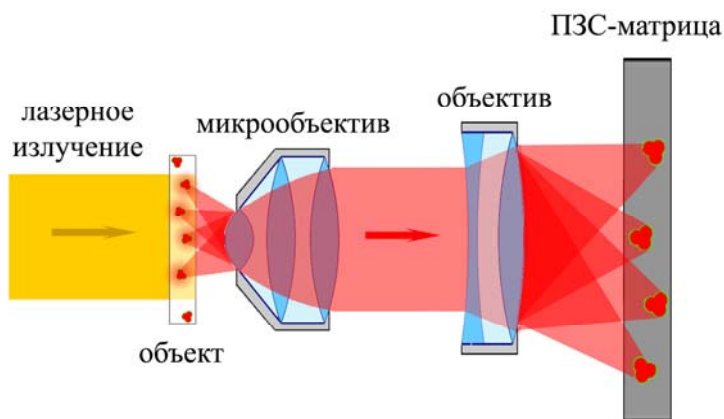


Рис. 1. Принципиальная схема регистрации спектров возбуждения флуоресценции одиночных молекул в твердых матрицах: люминесцентный микроскоп с многоканальным фотодетектором (высокочувствительная, охлаждаемая ПЗС-матрица) и «задней» засветкой.

Разработан измерительный комплекс для синхронной многоканальной регистрации спектров возбуждения флуоресценции и спектральных траекторий большого количества ОМ с использованием схемы люминесцентного микроскопа и высокочувствительной ПЗС-матрицы с внутренним размножением электронов. Разработано уникальное программное обеспечение для скоростного распознавания флуоресцентных изображений ОМ, регистрируемых с помощью ПЗС-камеры, идентификации индивидуальных спектров ОМ в различных точках исследуемого объекта (в поле зрения люминесцентного микроскопа, диаметр которого может составлять от нескольких десятков до нескольких сотен мкм). Важно подчеркнуть, что практически впервые была разработана уникальная

методика одновременной регистрации временных изменений спектров (спектральных траекторий) большого числа ОМ, позволившая выполнить ряд уникальных измерений и получить принципиально новую информацию о спектральной динамике примесных неупорядоченных твердотельных молекулярных сред при низких температурах.

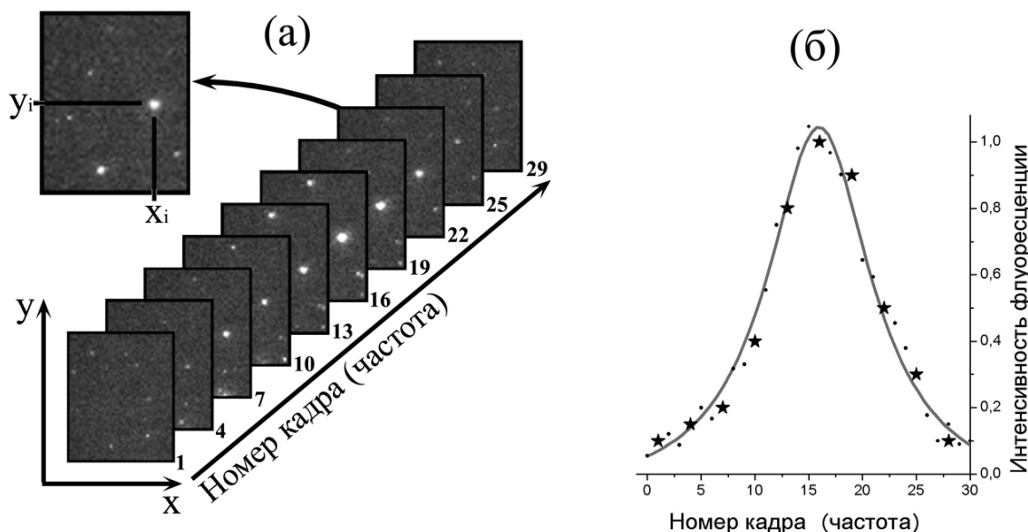


Рис. 2. Иллюстрация к процедуре извлечения спектра одиночной молекулы из последовательности зарегистрированных видеокadres: (а) - идентификация люминесцентных изображений одной и той же одиночной молекулы при сканировании частоты лазера; (б) - спектр возбуждения флуоресценции выбранной i -ой молекулы с координатами x_i, y_i (точки) и его аппроксимация функцией Лоренца (сплошная линия). Звездочки соответствуют видеокadres, изображенным на рис. (а).

Важнейшая особенность разработанного измерительного комплекса состоит в полной автоматизации процесса обработки экспериментальных данных. Это позволило принципиально сократить временные затраты на обработку данных и получать информацию о спектрах практически в режиме реального времени. Обработка данных, полученных в результате одной перестройки частоты возбуждения лазера (одного скана), занимает несколько секунд, что на несколько порядков превосходит имеющиеся аналоги. В частности, впервые в мире удалось реализовать синхронную регистрацию спектральных траекторий множества одиночных молекул с использованием схемы люминесцентного микроскопа (Рис. 3).

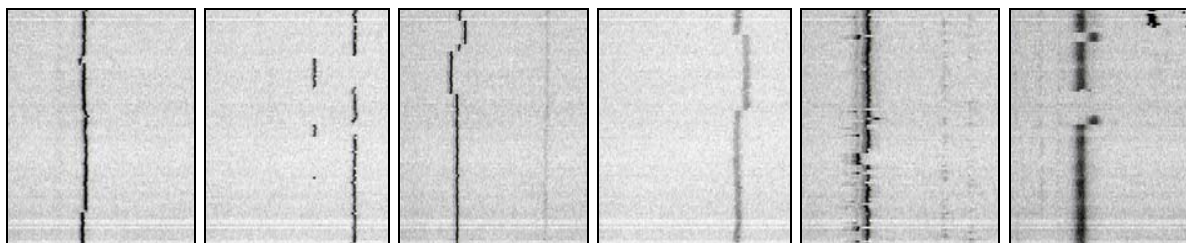


Рис. 3. Примеры спектральных траекторий молекул тетра-терт-бутилтеррилена в аморфном полиизобутилене, с использованием разработанного измерительного комплекса, зарегистрированных одновременно (синхронно). Всего в данном эксперименте регистрировалось одновременно несколько сотен спектральных траекторий.

Новый измерительный комплекс открыл принципиально новые возможности в применении метода СОМ для изучения и нанодиагностики динамических процессов в твердотельных молекулярных средах:

1. Впервые получена возможность проведения статистически достоверных измерений для большого количества изучаемых ОМ. С использованием разработанного комплекса набор высокоточных, статистически достоверных данных (для десятков – сотен тысяч одиночных молекул) занимает минуты-часы, что принципиально невозможно с использованием одноканальной схемы регистрации.

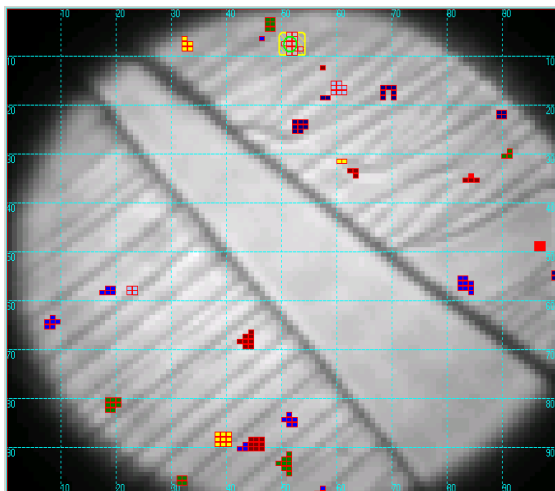


Рис. 4. Изображение флуоресцирующих молекул террилена внедренного в замороженный раствор 1,2-дихлорбензола, зарегистрированных с использованием схемы люминесцентного микроскопа.

2. Впервые получена возможность непрерывного и, что важно, синхронного мониторинга локальной динамики образца во всем поле зрения микрообъектива с одновременной микро-видеосъемкой оптического изображения самого исследуемого объекта. Эта возможность является принципиальной для прикладного использования техники СОМ в материаловедении, химии, биофизике, нанотехнологиях.

Создание методики одновременной регистрации спектральных траекторий позволило выполнить ряд уникальных исследований и получить принципиально новую информацию о спектральной динамике изучаемых твердотельных сред. В частности, проведены первые эксперименты, демонстрирующие уникальные возможности метода СОМ

для контроля дефектов и микротрещин в твердотельных материалах (вплоть до дефектов нанометровых размеров, когда диагностика другими методами становится невозможной) (Рис. 4). Черно-белое изображение, на котором хорошо видны микротрещины, получено при освещении белым светом. Каждый маленький цветной прямоугольник соответствует одному пикселю ПЗС-матрицы, зарегистрировавшему флуоресцентное излучение от одиночной молекулы. Смежные пиксели, закрашенные одинаковым цветом, соответствуют зарегистрированной одиночной молекуле террилена, спектр которой был распознан системой. Поле зрения микрообъектива 50х50 мкм. Хорошо видно, что молекулы наблюдаются лишь в области микротрещин.

3. Использование разработанного измерительного комплекса позволило значительно расширить круг исследуемых методом СОМ объектов. В частности, впервые проведены измерения спектров ОМ в низкомолекулярных органических стеклах (быстро замороженных жидкостях). Уже в ходе первых измерений было обнаружено необычное поведение спектров ОМ у низкомолекулярных жидкостей и полимеров с высоким молекулярным весом (Рис. 5). Ясно видна принципиальная разница во временном поведении спектров, соответствующая различной динамике локального окружения одиночных молекул-зондов в полимере (динамика, соответствующая модели туннелирующих ДУС) и стекле (наличие дополнительных хаотических прыжков и медленных дрейфов спектральных линий) [1].

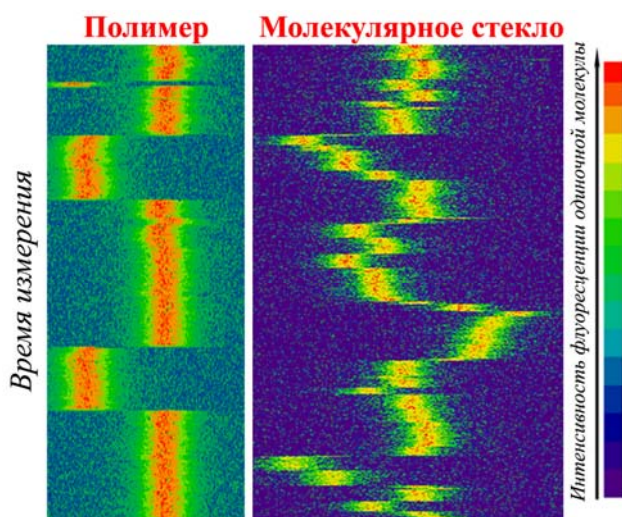


Рис. 5. Пример типичных спектральных траекторий примесных молекул тетра-tert-бутилтеррилена в аморфном полиизобутилене с молекулярным весом 420000 (а) и замороженном растворе толуола (б).

Если в случае полимеров с высоким молекулярным весом спектры ОМ демонстрировали временное поведение, полностью согласующееся со сложившимися представлениями о внутренней динамике неупорядоченных твердотельных сред, то быстрозамороженные низкомолекулярные жидкости, которые принято считать стеклами, и низкомолекулярные полимеры показывали поведение не соответствующее этим представлениям.

В этих средах наблюдались необъяснимые хаотические прыжки спектральных линий между многими случайными положениями, которые нельзя объяснить наличием туннельных переходов в ближайших

двухуровневых системах, а также непрерывные дрейфы частоты этих линий, которые также нельзя объяснить в рамках существующих представлений.

Таким образом, развитая экспериментальная техника предоставляет принципиально новые возможности как для фундаментальных исследований в физике конденсированного состояния, так и для решения широкого круга прикладных задач современного материаловедения и смежных областей науки и техники.

Литература

1. A.V. Naumov, Yu.G. Vainer, L. Kador, Does the standard model of low-temperature glass dynamics describe a real glass? *Phys. Rev. Lett.*, v.98, N 14, art. no. 145501 (**2007**).
2. Yu.G. Vainer, A.V. Naumov, M. Bauer, L. Kador, Isotope effect in the linewidth distribution of single-molecule spectra in doped toluene at 2 K, *J. Lumin.*, v.127, N 1, pp. 213-217 (**2007**).
3. Наумов А.В., Вайнер Ю.Г., "Параметры квазилокальных низкочастотных колебательных мод в стеклах: Измерения методами фотонного эха и спектроскопии одиночных молекул", *Известия РАН (серия физическая)*, т. 72, № 5, сс. 748-751 (**2008**).

Спектральное приборостроение

Группа спектрального приборостроения (к.ф.-м.н. А.М. Пындык, В.Н. Крашенинников, Н.И. Улицкий, В.П. Виноградов) возникла около 15 лет назад. Необходимость ее создания была обусловлена желанием оперативно воплощать в реальную практику те разработки и методики, которые возникали при решении экспериментальных задач в отделе и которые могли иметь более широкое научное и практическое применение. Так, например, разработка портативных спектрометров, работающих в спектральном диапазоне 190–1100 нм, была вызвана развитием в отделе новых эффективных методик люминесцентного спектрального анализа для определения сверхнизких концентраций органических и некоторых неорганических компонентов [1]. Для внедрения этих методик в

аналитическую практику необходимо было создать портативные спектрометры, отличающиеся от существующих высокой контрастностью (низким уровнем рассеянного света), наличием скоростной и высокочувствительной системы регистрации спектров, удобной связью с персональным компьютером и невысокой стоимостью [2].

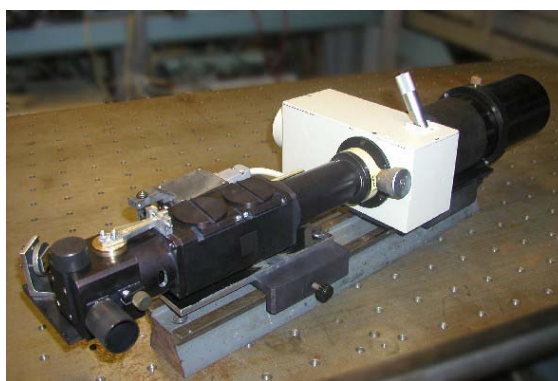
Достижение высокого контраста (“спектральной чистоты”) в короткофокусных портативных приборах потребовало выбора и тщательной отработки схемных решений. Вертикальная схема Эберта-Фасти обеспечивает на порядок меньший уровень рассеянного излучения по сравнению с горизонтальной, но ее реализация потребовала трудоемкой конструктивной проработки. Для достижения высокого контраста были разработаны также малогабаритные двойные монохроматоры, работающие, как по схеме сложения, так и вычитания дисперсии. Эти приборы обеспечивают контраст при монохроматизации широкополосного источника излучения на уровне 10^{-7} .

Для регистрации спектров (особенно слабых, например, спектров комбинационного рассеяния света (КРС)) был разработан многоканальный фотоприемник света, основанный на микроканальном электронно-оптическом преобразователе (ЭП-10, ЭП-16) и чувствительном супервидиконе ЛИ-702 [3]. Чувствительность разработанного фотоприемника позволяет детектировать слабые оптические спектры (на уровне отдельных фотоэлектронов) в реальном масштабе времени. Это особенно важно при регистрации спектров КРС биологических объектов в УФ-области. Импульсный режим работы фотоприемника (частота до 10^3 Гц при времени регистрации 10^{-6} с) также существенен при детектировании спектров КРС и люминесценции нагретых до высоких температур веществ. Основной вклад в эту разработку внес недавно умерший Н.И. Улицкий.

Вторая из разработанных систем регистрации основана на быстром сканировании выходной щели спектрометра и соединенных с ней посредством оптического волокна ФЭУ или фотодиода, охлаждаемого до температуры жидкого азота. В качестве третьей системы регистрации использовалась ПЗС-линейка, спектральный диапазон чувствительности которой лежит в области 190 – 1100 нм (разработка ООО «МОПС», рук. Э.Г.Силькис).



Малогабаритный спектрометр с ПЗС линейкой диапазона 200-1100 нм.



Спектрометр комбинационного рассеяния света с полупроводниковым лазером накачки.

Последние 5 лет в группе спектрального приборостроения разрабатывались компактные многоканальные спектрометры КРС с высокой чувствительностью и со спектральным разрешением до 0,1 нм. Разработка этих приборов была

вызвана все повышающимся интересом к колебательной спектроскопии КРС, число публикаций по которой превышает 1000 в год. Это разнообразные чисто научные и прикладные задачи в химии, биологии, медицине. Так, например, сейчас появились работы, в которых исследовались спектры КРС одиночных молекул. В настоящее время этот интерес усиливается благодаря все более широкому применению для аналитических целей метода гигантского комбинационного рассеяния (ГКР в русскоязычной литературе, SERS-в зарубежной). Этот эффект проявляется в виде огромного усиления (от 10^3 и до 10^{13} раз) интенсивности КРС на микрочастицах исследуемого вещества на поверхности таких металлов, как Ag, Au, Cu. В связи с потребностями практики актуально создание недорогих, переносных, автономных по питанию, простых в наладке, оснащенных диодными лазерами для возбуждения спектров и недорогими высокочувствительными многоканальными фотоприемниками для их регистрации спектрометров КРС. Было разработано, изготовлено и проверено на отдельных молекулярных объектах несколько типов компактных переносных спектрометров КРС.

Первый прибор весом 11 кг построен на основе вертикальной схемы Эберта-Фасти. Система фоторегистрации состоит из усилителя яркости и супервидикона. К настоящему времени прибор оснащен 10 недорогими малогабаритными лазерами с диодной накачкой (532 нм) с общей мощностью 50 мВт. Это позволяет регистрировать дистанционно (на расстояниях до 5-20 см) спектры КРС твердых, жидких и газообразных молекулярных объектов с разрешением $15\text{-}20\text{ см}^{-1}$.

Два других прибора включают в себя: светосильный спектрограф ($1/2,5$, $f=75$ мм, $D=2,1$ нм/мм, спектральное разрешение $0,1$ нм), многоканальную систему регистрации (усилитель яркости + CCD матрица), регистрирующую одиночные фотоэлектроны, систему освещения образца и сбора сигналов, а также наблюдения объекта по схеме микроскопа с разрешением 2 мкм. Приборы оснащены двумя лазерами: диодным с длиной волны 635 нм, мощностью 25 мВт и малогабаритным лазером с диодной накачкой ($\lambda=532$ нм, $P=5$ мВт). Регистрируемый спектр может быть также сфотографирован (накоплен) с помощью бытового цифрового фотоаппарата и в дальнейшем обработан с помощью компьютера. Потери в разрешении или искажение интенсивностей линий при такой регистрации отсутствуют. Один из этих приборов (его вес 12 кг) имеет встроенный ЖК монитор для визуализации образца и индикации регистрируемых спектров. Возбуждение объекта и сбор КРС осуществляется в нем под углом 180° . Регистрируемые спектры КРС с разрешением 3 см^{-1} наблюдаются на ЖК мониторе или на компьютере в реальном масштабе времени. Второй прибор несколько легче (вес 10 кг). ЖК монитор в его



Студентка 6-го курса МФТИ Е.С.Садовская (слева) с научным руководителем, ведущим научным сотрудником сектора электронных спектров молекул А.М.Пындыком (справа).

состав не входит, возбуждение и сбор КРС осуществляются в 90° конфигурации. Это позволяет увеличить принимаемый сигнал в случае жидких объектов до 100 раз. В случае сильно поглощающих объектов, например, порфиринов сигнал КРС можно увеличить еще сильнее (до 1000 раз), если объект располагать под углом 5° к возбуждающему сфокусированному лучу лазера, что предусмотрено конструкцией прибора. Спектральное разрешение этого прибора - 6 см^{-1} .

Перечисленные приборы предназначены также для регистрации спектров ГКР при исследованиях сверхнизких следовых концентраций, прежде всего, биологических объектов. С этой целью проверяются различные методы приготовления, прежде всего, Ag-поверхностей, в том числе и метод создания атомных нанообъектов на поверхности, разработанный в лаборатории лазерной спектроскопии ИСАН (В.И.Балыкин). Это позволит исследовать молекулы на наноструктурах серебра специальной конфигурации и, вероятно, изучать взаимодействие между различными одиночными молекулами.

Интересной приборной разработкой в области спектроскопии КРС является многоканальный портативный спектрометр, ориентированный на анализ и идентификацию состава жидких и твердых проб, а также органических молекулярных соединений. В частности, прибор предназначен для идентификации органических диэлектрических пленок и полупроводников, жидких кристаллов, пищевых продуктов, медицинских препаратов. Основными функциональными узлами прибора являются: полупроводниковый диодный лазер ($\lambda=657\text{ нм}$, $P=60\text{ мВт}$), оптическая система повышения контраста лазерного излучения и фокусировки излучения на образец, система сбора рассеянного излучения с подавлением излучения на лазерной частоте, анализатор спектра рассеянного излучения (полихроматор), многоканальный фотоприемник на основе усилителя яркости и линейного прибора с зарядовой связью - ПЗС. Рабочая спектральная область прибора $400\text{--}2000\text{ см}^{-1}$, спектральное разрешение 8 см^{-1} . Спектрометр КРС не содержит ни одного подвижного элемента.

Для контроля параметров излучения полупроводниковых лазеров, которыми оснащены созданные спектрометры КРС был специально разработан компактный спектрометр ($F=200\text{ мм}$) на основе эшелле-решетки ($37,5\text{ штр./мм}$, угол блеска 78°). Разрешающая способность прибора не хуже 30000 и постоянна во всем рабочем диапазоне $200\text{--}800\text{ нм}$. Рабочие порядки эшелле-решетки 65-260.

За последние годы в аналитической практике широкое распространение получила спектрометрия ближнего ИК диапазона. В связи с этим были созданы два многоканальных спектрометра для регистрации спектров поглощения и диффузного рассеяния в спектральных областях $800\text{--}1070\text{ нм}$ и $1100\text{--}1700\text{ нм}$. Прибор, предназначенный для регистрации спектров в первом из указанных спектральных диапазонов, оснащен многоканальным фотоприемником на основе кремниевого линейного ПЗС, в приборе, разработанном для второго спектрального интервала, используется линейный InGaAs ПЗС. С применением этих спектрометров проводились исследования по определению дисперсности нефтяных систем [4] и изучалась возможность построения калибровочных моделей для количественного определения массовых долей основных компонентов такой сложной многокомпонентной органической смеси, как молоко [5].

На основе проведенных разработок был создан целый ряд малогабаритных портативных спектрометров для эмиссионного и люминесцентного анализа, регистрации спектров поглощения и КРС. Всего было разработано около 25 приборов для более трех десятков научных организаций России. При их создании использовался опыт предыдущей работы с ГОИ (И.В. Пейсахсон) и результаты

совместной работы с сотрудниками ИСАН (В.Б. Подобедов, В.Н. Денисов, Р.П. Сургутсков, Г.Ю. Лопатовский).

Один из приборов был создан совместно с Физфаком МГУ им. М.В. Ломоносова. Спектрометры демонстрировались на отечественных и зарубежных выставках (Германия, США и Япония). Спектрометр MS150 с многоканальной системой регистрации на базе электронно-оптического преобразователя и супервидикона успешно использовался для выполнения работ по договору с Ливермором (США). Два прибора поставлены в один из университетов США. На основе малогабаритного спектрометра ($f=300$ мм) был построен многоканальный спектрофотометр, который использовался в ходе плановых научно-исследовательских работ по изучению механизмов выжигания спектральных провалов [6,7]. Разработанная многоканальная система регистрации спектров в сочетании со спектрографом, построенном по схеме Эберта ($f = 150$ мм), использовалась для определения концентрации уранила в воде ($C \leq 10^{-7}$ г/л) люминесцентными методами, при изучении полярных сияний и для регистрации спектров КРС. С использованием разработанного в группе спектрометра для измерения эмиссионных спектров проводились совместные исследования процессов высокотемпературного горения и турбулентных реагирующих течений в присутствии электрического разряда в аэродинамических трубах и идентификации образующихся при этом продуктов совместно с ЦАГИ [8]. В настоящее время готовятся совместные с ЦАГИ и ИВТАН эксперименты по исследованию эмиссионных спектров и спектров КРС в пламенах.

Отметим также, что в группе был разработан и изготовлен сдвоенный (двухканальный) спектрограф с регистрацией спектров обеих каналов на одну и ту же приемную линейку. Этот прибор был разработан специально для экспериментов типа "pump-probe" в лаборатории ультрабыстрых процессов ИСАН. С его использованием было получено много интересной и важной информации о процессах спектральной релаксации при воздействии на вещество мощных фемтосекундных импульсов.

Литература

1. Альшиц Е.И., Крашенинников В.Н., Куликов С.Г., Харламов Б.М., «Исследование кристаллической воды при низких температурах с использованием селективного лазерного возбуждения флуоресценции примесного иона уранила». Оптика и спектроскопия, т.81, №6, 956-961, 1996.
2. Виноградов В.П., Крашенинников В.Н., Пындык А.М., Улицкий Н.И., Платов Ю.В., «Портативный многоканальный спектрометр». Приборы и техника эксперимента, №5, 163-164, 1996.
3. Плахотник Т.В., Пындык А.М., Крашенинников В.Н., Виноградов В.П., «Многоканальная система счета фотонов с высоким пространственным разрешением». Приборы и техника эксперимента, №1, 169-171, 1988.
4. «NIR-spectroscopy for the determination of dispersity of petroleum systems», Potapov A.V., Krasheninnikov V.N., The 8th International Conference on Petroleum Phase Behavior and Fouling, June 10 - 14, 2007, PAU, France, Abstract book, p.142.
5. «Портативный анализатор показателей качества молочных продуктов на основе спектрометрии ближнего ИК диапазона», А.В.Калинин, В.Н.Крашенинников, Журнал прикладной спектроскопии, т.75, №2, 2008, стр.274-279.
6. V.N.Krasheninnikov, V.V.Ponkratov, B.M.Kharlamov, «Rivel photochemical and nonphotochemical burning mechanisms in porphyrine doped polymers», 7th International Meeting on Hole Burning, Single Molecule, and Related Spectroscopies:

Science and Applications, HBSM2001, Taipei, Taiwan, ROC, November 18-23, 2001, Book of abstracts, P26.

7. Krashenninnikov V.N., Ponkratov V.V., Kharlamov B.M., «Rivel photochemical hole-burning mechanisms in porphyrine doped polymers». Journal of Luminescence, v.98, №1-4, 221-229, 2002.

8. «Спектроскопические исследования продольного разряда в сверхзвуковом потоке воздуха при инъекции пропана в зону разряда», В.В.Иванов, В.В.Скворцов, Б.Г.Ефимов, А.М.Пындык, А.Ю.Киреев, В.Н.Крашенинников, С.В.Шиленков, Теплофизика высоких температур, т.46, №1, 2008, стр.3-10.

Сектор микроволновой спектроскопии



Сектор (группа) микроволновой спектроскопии возник в ИСАН практически одновременно с образованием Института. Становление сектора обязано высококлассному экспериментатору к.ф.-м.н. Б.Д.Осипову и яркому теоретику д.ф.-м.н. М.Р.Алиеву. Работы Бориса Дмитриевича характеризуются высочайшей точностью спектральных исследований и являются тем образцом, которого стараются придерживаться сотрудники сектора. Им проделаны измерения микроволновых переходов в ряде молекул, в частности туннельного расщепления ND_3 (совместно с С.Н. Мурзиным), которые до сих пор являются эталонными.

Основной его работой были поиски гексадекупольных моментов атомных ядер, которые можно определить по особенностям сверхтонкой структуры молекулярных спектров. Для этих исследований им был создан уникальный по чувствительности и абсолютному спектральному разрешению (1 кГц) спектрометр двойного микроволнового – миллиметрового резонанса. К сожалению, завершить эту работу Б.Д. Осипову не удалось. Но проведенное им изучение спектров CH_3Br и CH_3I дает ярчайший пример богатства обнаруженных сверхтонких расщеплений и точности измерения их величины.

Мамед Рагимович Алиев внес большой вклад в теорию спектров нежестких молекул. Он разработал общую методику определения симметрии и расчета коэффициентов высших порядков колебательно–вращательного взаимодействия. В цикле работ по теории запрещенных (в приближении жесткого волчка) переходов он совместно с к.ф.-м.н. В.М.Михайловым показал, что эффекты колебательно–вращательного взаимодействия, ангармонизма и даже ядерных сверхтонких взаимодействий приводят к существенному ослаблению правил запрета. Основные работы М.Р.Алиева вошли в написанные им совместно с Д. Папоушком монографию «Колебательно–вращательные спектры молекул» и совместно с Ватсоном обзор «Эффекты высших порядков в колебательно–вращательных спектрах квазижестких молекул» в “Molecular Spectroscopy: Modern research” Vol. 3, ed. K.N. Rao 1985.

Основное направление деятельности сектора со второй половины 80-х годов — исследование спектров высокого разрешения молекул и молекулярных комплексов в области миллиметровых длин волн. Нами совместно с Институтом метрологии времени и пространства (ИМВП) НПО ВНИИФТРИ разработан и создан уникальный по чувствительности измерения поглощения ($\gamma_{\min}=3 \times 10^{-10} \text{ см}^{-1}$) и спектральному разрешению внутрирезонаторный спектрометр на базе *оротрона*, являющийся высокостабильным, перестраиваемым в широком

диапазоне генератором излучения в миллиметровой области спектра. На нем проведены исследования запрещенных спектральных переходов в SiH_4 и ND_3 .



Рис. 1. Спектрометр высокого разрешения на базе оротрона для экспериментов с молекулярной струей.

В конце 90-х годов нами совместно с ИМВП и Кёльнским университетом создана модификация этого спектрометра для исследования молекул и молекулярных комплексов в сверхзвуковой струе и достигнута чувствительность по поглощению, на два порядка превышающая характеристики зарубежных аналогов. На этом спектрометре нами налажена методика нелинейной субдоплеровской спектроскопии лэмбовских провалов и впервые во вращательных спектрах молекул обнаружено бездоплеровское двухфотонное поглощение.

Исследование слабосвязанных молекулярных комплексов

Основным направлением работ на оротронном спектрометре явилось изучение спектров слабосвязанных ван-дер-ваальсовских (ВДВ) комплексов, которое является самым надежным количественным способом исследования ВДВ взаимодействия. Специфика слабосвязанных комплексов состоит в том, что для них характерны движения большой амплитуды и спектры чувствительны к особенностям потенциала ВДВ в широком диапазоне расстояний и углов. Нами проведено систематическое изучение комплексов R-CO , где R – атомы инертных газов и легкие двухатомные молекулы H_2 , N_2 . Наиболее легкие из этих комплексов настолько слабо связаны, что в них наблюдаются почти свободные вращения молекул мономеров. Изучение их существенно расширяет представления о возможных типах молекулярных движений. Следует отметить, что спектры $\text{H}_2\text{-CO}$, He-CO , $(\text{CO})_2$ важны также для астрофизики, так как эти комплексы присутствуют (и возможно будут обнаружены) в межзвездной среде, поскольку CO – наиболее распространенная в космосе полярная молекула.

Нам удалось исследовать процесс перехода от классического случая вращения жесткого волчка к таким движениям и выявить основные черты этого перехода. На основе наших спектральных данных были уточнены потенциалы взаимодействия R-CO . По результатам этих исследований опубликован обзор: Б.С. Думеш, Л.А. Сурин «Необычные вращения в нанокластерах гелия и водорода и «наноскопическая» сверхтекучесть». УФН 176, 1137 (2006).

Кроме того, нами изучены спектры димера $(\text{CO})_2$, который в течение 25 лет считался одним из самых загадочных объектов молекулярной спектроскопии. В этом димере нами обнаружено более 500 спектральных линий, из которых 360 идентифицировано и определено положение 100 уровней энергии в диапазоне $0\text{--}19\text{ см}^{-1}$. В основном они относятся к нетривиальному изгибному колебанию типа

цепной передачи с энергией 3см^{-1} и его обертонам. На основе наших данных голландские теоретики рассчитали потенциал взаимодействия CO–CO.

Литература

L.A. Surin, D.N. Fourzikov, T.F. Giesen, S. Schlemmer, G. Winnewisser, V.A. Panfilov, B.S. Dumesh, G.W.M. Vissers, A van der Avoird Higher Energy States in the CO Dimer: Millimeter-Wave Spectra and Rovibrational Calculations J. Phys. Chem. A 2007, 111, 12238.

Исследование нанокластеров HeN-CO

В последнее время мы начали работы по спектроскопическим исследованиям нанокластеров He_N-CO. Эти исследования позволяют навести мосты между микромиром индивидуальных молекул и макромиром конденсированных сред. Из полярных молекул у CO самая малая энергия связи с He (6см^{-1}), близкая к химическому потенциалу жидкого гелия (5см^{-1}). Поэтому CO не вносит сильных возмущений в свойства кластера, что позволяет проследить каким образом и с какого размера кластера наступает сверхтекучесть. Измерение вращательных спектров кластера позволяет определить его момент инерции и выяснить с какого размера начинается проскальзывание при вращении центральной молекулы, а по ширине спектральных линий можно судить о степени бездиссипативности этого движения.

Для получения таких кластеров нами усовершенствована система источника сверхзвуковой молекулярной струи. В результате температура газа в струе понижена до 0.2K, получены кластеры He_N-CO, N=2–10 и впервые измерены их вращательные спектры. На рис. 2 приведена запись R(0) перехода b типа в He₁₀-CO (вторая производная формы линии). Наиболее интересный результат состоит в том, что уменьшение измеряемого момента инерции при росте кластера, свидетельствующее о проскальзывании гелиевой шубы при вращении CO уверенно наблюдается уже начиная с He₄-CO. Степень бездиссипативности этого движения определяется тем, что во всех кластерах ширины линий определяются доплеровским механизмом и никакого дополнительного уширения не наблюдается. Если это явление действительно связано со сверхтекучестью, она начинает проявляться уже в системах из четырех атомов гелия. По материалам данной работы готовится статья в Phys. Rev. Letters.

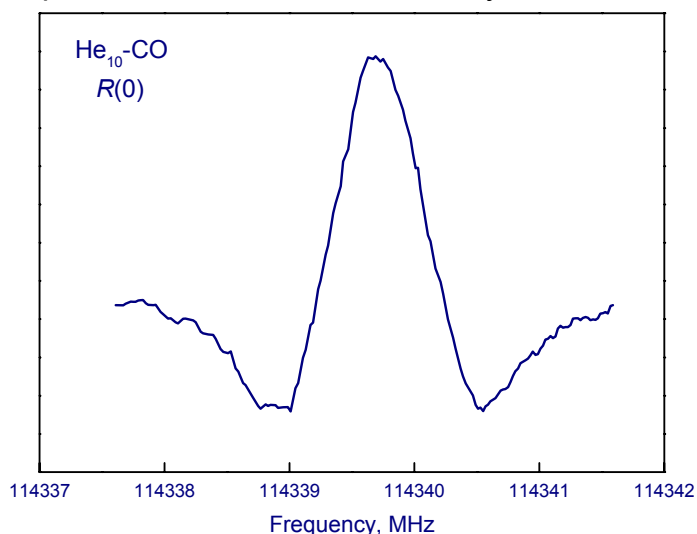


Рис. 2. J=0→1 вращательный переход в He₁₀-CO.

Исследование структурных особенностей нефтей

Нефти представляют собой сложные растворы из фракций с различным молекулярным весом, пронизанные различными текстурами. Эти текстуры, образованные высокомолекулярными соединениями – асфальтенами, достаточно сильно влияют на физико–химические характеристики реальной нефти и, соответственно, процессы ее добычи, транспортировки и переработки. К сожалению, надежные микроскопические способы исследования текстуры нефти до сих пор отсутствуют.

Мы предприняли поисковые исследования реальной нефти и ее производных различными методами оптической спектроскопии. Основные измерения проводились на спектрофотометре Specord M400 (В.Н. Крашенинников) и разработанном лабораторией лазерно-спектрального приборостроения ИСАН спектрометре кругового дихроизма СКД-2 (С.Ф.Кольяков). Показано, что сигнал кругового дихроизма связан именно с асфальтенами, так как его спектр совпадает с известным спектром поглощения последних. Кроме того, сигнал дихроизма не наблюдается в легких нефтяных фракциях (бензины, керосины), где асфальтены отсутствуют. Основные стадии образования текстур надежно отражаются на особенностях концентрационных зависимостей сигнала дихроизма. В результате определены концентрации асфальтенов в нефти, при которых начинается рост стопок асфальтенов, (начальный этап образования текстур) и концентрации, соответствующие образованию мицелл (развитые текстуры). Таким образом, нами разработан удобный способ исследования текстур в нефти. Эти результаты опубликованы в статьях, приведенных в списке литературы.

Литература

1. A.V. Potapov, S.F. Kolyakov, V.N. Krashennnikov, B.S. Dumesh Circular dichroism of crude oil and its derivatives. Role of permolecular structures Journal of Colloid and Interface Science 303 159 (2006).
2. A.V. Potapov, S.F. Kolyakov, V.N. Krashennnikov, R.Z. Syunyaev Circular dichroism of crude oil: influence of micelle formation Energy and Fuels 22, 561 (2008).

Совершенствование оротронов миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов

Сектор принимает участие в проводимых ИМВП ВНИИФТРИ и ИПФ РАН работах по совершенствованию широкодиапазонных генераторов миллиметрового и субмиллиметрового излучения – оротронов. В последние годы нашей коллаборацией создан оротрон с мощностью излучения 0.5 Вт (длина волны 2 мм), что на порядок превышает мощность других перестраиваемых по частоте генераторов излучения этого диапазона.

В настоящее время нами разработан проект комбинированного генератора терагерцового излучения на основе оротрона с размещенной в его резонаторе матрицей умножительных диодов и началась его реализация. Можно надеяться, что удастся создать когерентный широкодиапазонный источник терагерцового излучения с мощностью несколько милливатт.

Литература

1. В.Л. Братман, В.А. Гинцбург, Ю.А. Гришин, Б.С. Думеш, Ф.С. Русин, А.Э. Федотов Импульсные широкодиапазонные оротроны миллиметровых и субмиллиметровых волн Известия ВУЗов. Радиофизика, 49, №11 (2006).
2. V.L. Bratman, I.V. Bandurkin, B.S. Dumesh, A.E. Fedotov, Y.K. Kalynov, N.G. Kolganov, V.N. Manuilov, F.S. Rusin, S.V. Samsonov, and A.V.Savilov Sources of Coherent Terahertz Radiation, AIP Conference Proceedings 807, 356-366 (2006).

Исследование ЯМР в магнитоупорядоченных веществах

В 90-х годах сотрудники сектора совместно с ИФП РАН участвовали в исследованиях квазиодномерных антиферромагнетиков методом ЯМР на ядрах магнитных ионов (^{55}Mn). Для этой цели был разработан непрерывный ЯМР спектрометр дециметрового диапазона с перестраиваемым резонатором и автоматической подстройкой генератора излучения. Эта установка позволила измерять ЯМР в сильных магнитных полях, недоступных стандартным импульсным спектрометрам. В этих исследованиях были открыты эффект подавления квантовых флуктуаций спинов в антиферромагнетиках магнитным полем (CsMnBr_3 , RbMnBr_3 , CsMnI_3), обнаружена анизотропия этого эффекта и новая магнитная фаза в легкоосных квазиодномерных антиферромагнетиках, обязанная своим существованием этой анизотропии (CsMnI_3). По результатам этих исследований опубликован обзор: Б.С. Думеш, УФН 176, 1137 (2006).

В настоящее время в секторе разрабатывается более чувствительный непрерывный ЯМР спектрометр дециметрового диапазона.

Сотрудниками сектора защищены две докторские диссертации - М.Р. Алиева и Б.С. Думеша, и подготовлена к защите докторская диссертация Л.А.Сурина.

Теоретический отдел



С.А.Дарманиян) и сектор спектроскопии фазовых переходов (зав.сектором А.Г.Мальшуков).

Большую роль в работе теоретического отдела до перестройки сыграл еженедельный семинар теоротдела, на который часто приглашались и докладчики из других институтов. За это время, т.е. до 1993 года, в отделе было проведено около тысячи заседаний. Обычно заседания проходили в полезных дискуссиях. В результате сотрудники отдела приобрели широкие познания в различных областях физики конденсированных сред, что полезно сказалось в их дальнейшей работе. После перестройки В.Рупасов, В.Кравцов, И.Лернер и В.Черняк перешли на работу за рубежом. В.Кравцов в настоящее время руководит секцией конденсированных сред в Международном Центре Теоретической Физики в Триесте (Италия), И.Лернер – профессор Университета в Бирмингеме (Англия), В.Черняк – профессор Калифорнийского Университета (США), В.Рупасов – главный теоретик одной из компаний в США. Все они продолжают успешно заниматься теоретической физикой и с благодарностью вспоминают наш семинар и годы, проведенные в ИСАН.

В отделе было подготовлено около 20 кандидатов наук, многие из которых в дальнейшем защитили докторские диссертации.

В 1993 году в теоротдел перешел кандидат физико-математических наук А.М.Камчатнов. Он выполнил в теоротделе ряд исследований по спектроскопии наноструктур и затем очень успешно продолжил свои исследования ударных волн, в частности, в бозе-эйнштейновском конденсате (см. ниже).

Перестройка в нашей стране открыла ученым пути международного сотрудничества. В настоящее время почти все сотрудники теоротдела выполняют совместные исследования с учеными Англии, Италии, Германии, Японии, США, Швеции, Норвегии, Тайваня, Бразилии и других стран.

В теоретическом отделе работают 6 докторов наук (В.М.Агранович, А.Г.Мальшуков, Б.П.Антонюк, А.М.Камчатнов, В.И.Юдсон, С.А.Дарманиян) и 3 кандидата физико-математических наук (М.Литинская, В.Шляпин, С.Шульга). За последние 5 лет сотрудники отдела опубликовали 150 статей и две монографии (Б.П.Антонюк).

Многие результаты исследований, проведенных в теоретическом отделе, широко известны мировой научной общественности и часто цитируются. Для того, чтобы проиллюстрировать некоторые из результатов, ниже приведены краткие их описания, в которых, в основном, обсуждаются физические идеи, а детальное обоснование этих идей может быть найдено в опубликованных работах.

Резонансные гибридные наноструктуры для оптоэлектроники

В.М.Агранович

Большинство коммерческих оптоэлектронных приборов созданы на основе неорганических полупроводников (НПП). С другой стороны, органические электронные материалы (ОМ) также начали использоваться как альтернатива неорганическим материалам, в частности, для создания нового типа электрических источников света (ЭИС) и ячеек, превращающих свет солнца в электрический ток (solar cells). Кристаллические НПП обладают хорошей электрической проводимостью, однако они являются дорогими и обладают относительно невысокими оптическими характеристиками. ОМ-ы являются более дешевыми в производстве и могут обладать большими оптическими силами осциллятора, однако использование таких материалов ограничено в них малой подвижностью носителей заряда. В связи с этим предложено было фундаментально новое направление исследований с целью преодолеть некоторые из упомянутых ограничений, типичных для обычных материалов (см. [1]). Сущность идеи состоит в создании нового класса многофункциональных опто-электронных материалов. Речь идет о резонансных гибридных (органика-неорганика) наноструктурах, в которых их свойства основаны на резонансном переносе энергии, а не на переносе зарядов.

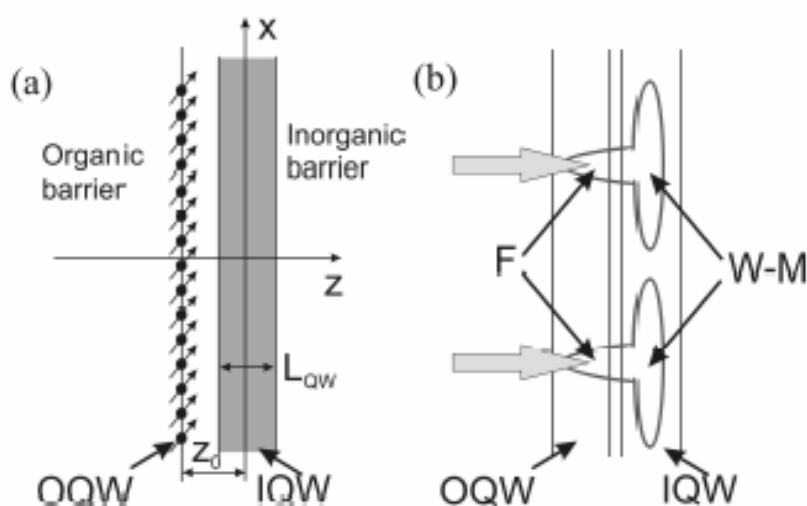


Рис. 1. (a) The configuration under study: organic and inorganic QWs (OQW and IQW). (b) Frenkel (F) and W-M excitons in the nanostructure. Light pumping (grey arrows) through Frenkel excitons and exciton-exciton interaction through W-M excitons cause a strong enhancement of the resonant nonlinearity.

В таких гибридных структурах (Рис.1а) энергии электронных возбуждений в органической части гибридной структуры (экситоны Френкеля, интенсивные электронные переходы) и в полупроводниковой части гибридной структуры (экситоны Ванье-Мотта, электрон-дырочные пары, большой экситонный радиус и обусловленные экситон-экситонным взаимодействием большие значения резонансных нелинейных поляризуемостей, Рис.1б) должны быть близки [1]. Полупроводниковая часть гибридной структуры, вообще говоря, обладает хорошей проводимостью и ее можно возбуждать, используя известные методы электрической накачки полупроводниковых квантовых ям. Как это было предсказано теоретически и как это было подтверждено экспериментально, резонансное взаимодействие возбуждений в наноструктурах приводит к весьма

эффективной передаче энергии от неорганической квантовой ямы к органике с последующим высвечиванием. Так как, по предположению, в используемой органике экситон Френкеля имеет большую силу осциллятора, описанная структура позволяет предложить новый тип эффективного нано-источника света с электрической накачкой [2]. Добавление в органику различного рода примесей позволяет изменять цвет излучения, что существенно расширяет область применений описанной гетеро-наноструктуры.

Прежде чем описывать теперь уже многочисленные эксперименты, подтвердившие описанную выше физическую картину явлений, сделаем несколько замечаний, касающихся возможного разнообразия конфигураций гибридных структур. В связи с этим заметим, что перенос энергии электронного возбуждения от квантовой ямы к органике осуществляется, если расстояние между ними порядка поперечного размера квантовой ямы, т.е. порядка 1 нм. Если резонансное взаимодействие между экситоном в квантовой яме и экситоном в органическом слое велико (режим сильной связи) по сравнению с диссипативной шириной экситонных уровней, то при резонансе возбужденных состояний возникают два гибридных когерентных экситонных состояний. В таких состояниях возбуждение, грубо говоря, часть времени живет как экситон Френкеля, а часть времени как экситон Ванье-Мотта. Такие состояния интересны тем, что их сила осциллятора велика как у экситона Френкеля и, кроме того, их радиус велик, как это имеет место для экситона Ванье-Мотта. Поэтому в этом случае можно ожидать (Рис.1б) значительное увеличение резонансных оптических нелинейностей. Необычные свойства многообразных резонансных гибридных структур, описанных в [1], привлекли внимание экспериментаторов. В статье, подготовленной Д.Брэдли и его сотрудниками [3], подчеркивается, что комбинация обоих типов материалов в одной и той же наноструктуре открывает новые перспективы для опто-электроники.

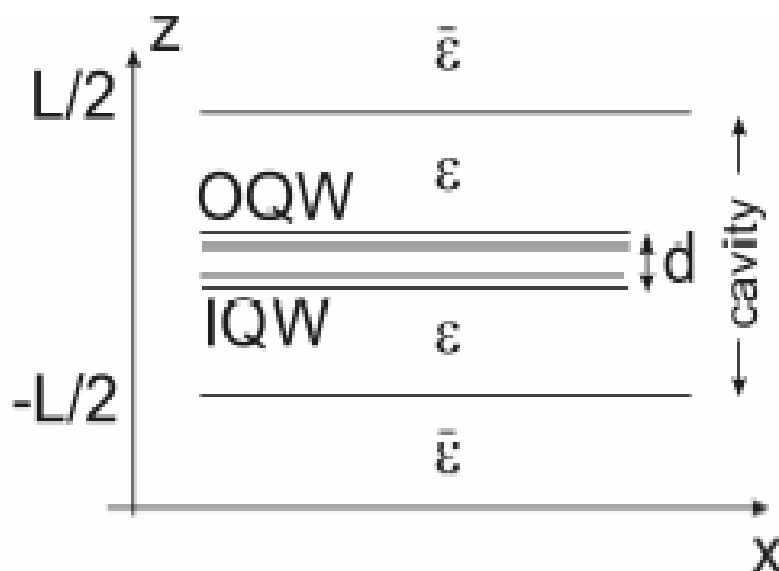


Рис. 2. Схема микрорезонатора, содержащего органическую и неорганическую квантовые ямы.

Органическая и полупроводниковая компоненты гибридной структуры могут быть также помещены в микрорезонатор, (Рис.2). Частоты фотонов, которые существуют в микрорезонаторах, в отличие от фотонов в бесконечном пространстве, ограничены снизу предельным значением $\omega_0 \approx c/L$, где c – скорость света, L - характерный размер микрорезонатора. Если, например, $L \sim 100$ нм, величина ω_0 оказывается порядка $10^{15} \frac{1}{\text{сек}}$, т.е. может быть близка к резонансу

с экситоном. В этом случае возможно образование гибридных состояний, являющихся суперпозицией состояний фотона микрорезонатора и обоих экситонных состояний. Взаимодействие экситонов Френкеля и Ванье-Мотта в разделенных компонентах структуры в этом случае осуществляется посредством обмена виртуальными фотонами микрорезонатора [4].

Важным в этой связи в работе [4] было также предсказание для экситонов Френкеля гигантских величин расщепления Раби, обнаруженное вскоре и экспериментально. Особенности различных физических процессов в микрорезонаторах, содержащих только органику, обсуждаются ниже в заметке Марины Литинской. Здесь же мы лишь отметим, что совсем недавно были опубликованы первые эксперименты [5,6], демонстрирующие впервые созданные описанные выше гибридные микрорезонаторы. Такого рода структуры обладают отмеченным в [5,6] целым рядом интересных особенностей, отсутствующих в неорганических микрорезонаторах. Их дальнейшее изучение представляет несомненный интерес также и для приложений.

После сделанных выше кратких замечаний, вернемся к таким гибридным структурам, где органический слой находится в непосредственном контакте с неорганической полупроводниковой квантовой ямой и где осуществляется режим слабой связи. Вероятность переноса энергии электронного возбуждения в таких гибридных структурах может быть весьма значительной. В течение последних нескольких лет этот эффект был убедительно продемонстрирован экспериментально во многих ведущих научных лабораториях [5-8]. В качестве примера на Рис.3(а,б) мы приводим результаты одного из экспериментов, выполненных в Берлинском Университете им. А.Гумбольдта в группе проф. Ф.Хеннебергера [8].

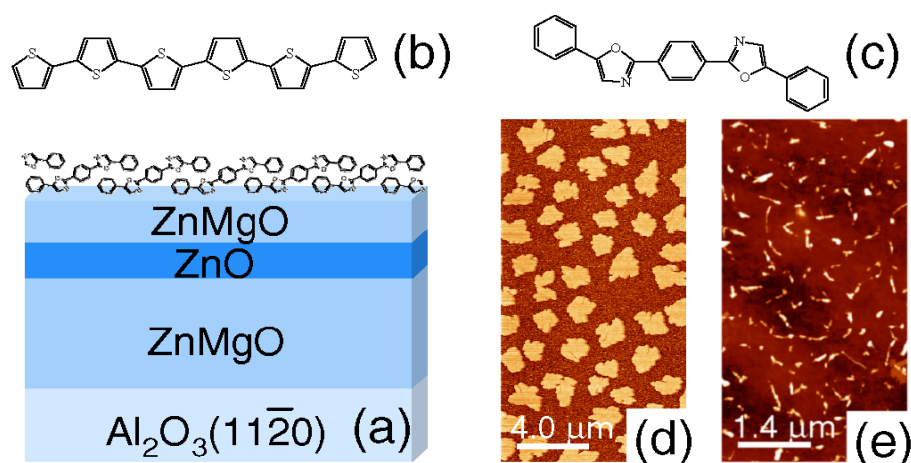
**Converting Wannier Into Frenkel Excitons
In an Inorganic/Organic
Hybrid Semiconductor Nanostructure**

S. Blumstengel, S. Sadofev, C. Xu, J. Puls, and **F. Henneberger**
(Phys.Rev.Lett, 97, 237401, 2006)

Electronic coupling between Wannier and Frenkel excitons in an inorganic/organic semiconductor hybrid structure is experimentally observed. Time-resolved photoluminescence and excitation spectroscopy directly demonstrate that electronic excitation energy can be transferred with an efficiency of up to 50% (80%- RECENT RESULTS) from an inorganic ZnO quantum well to an organic [2,2-*p*-phenylenebis-(5-phenyloxazol), -sexithiophene] overlayer. The coupling is mediated via dipole-dipole-interaction analog to the Förster transfer in donor-acceptor systems.

Рис. 3а. Абстракт статьи Ф. Хеннебергера и др.

В этих экспериментах было показано, что (см. также [10]) созданные в [8] неорганические квантовые ямы способны передавать органике до 75% от ее полной энергии возбуждения. В настоящее время уже сделаны первые шаги создания обсуждаемых приборов с электрической накачкой.



(color online). (a) Sketch of the hybrid nanostructure. The 4 nm wide ZnO QW is situated on top of a 600 nm thick ZnO:9MgO:10O barrier layer grown on a Al₂O₃1120 substrate. The growth direction is along the wurtzite c axis. After capping with a ZnO:9MgO:10O spacer of variable thickness (0–50 nm), the sample is transferred into the adjacent chamber where the organic layer is deposited. (b),(c) Structures of 6T and POPOP. (d),(e) AFM images of 6T and POPOP deposited on ZnO00014 at a substrate temperature of 100 °C (6T) and 25 °C (POPOP), respectively, and a deposition rate of 1 Å/s.

Рис. 36. Структура, изученная в группе Ф. Хеннебергера.

В упомянутых выше теоретических работах [1] было отмечено, что резонансное взаимодействие и обмен энергией электронного возбуждения также между неорганическими квантовыми точками и органикой может быть весьма эффективным. В связи с этим большой интерес вызывают результаты недавно выполненных под руководством В.Буловича (MIT) и А.Нурмикко (Braun Университет) [12] исследований переноса энергии от неорганических квантовых точек к органике и наоборот, от органики к квантовым точкам. Второй процесс оказался весьма эффективным (98%). Это обстоятельство представляет особый интерес, поскольку эффективный перенос энергии электронного возбуждения от органики, сильно поглощающей свет, к квантовым точкам (или к квантовым ямам) может оказаться полезным для создания нового типа солнечных источников электричества (solar cells). Этот интерес связан с тем, что в квантовых точках в настоящее время ведутся широкие исследования процессов множественного рождения носителей заряда. Изученная в [10] наноструктура показана на Рис.4.

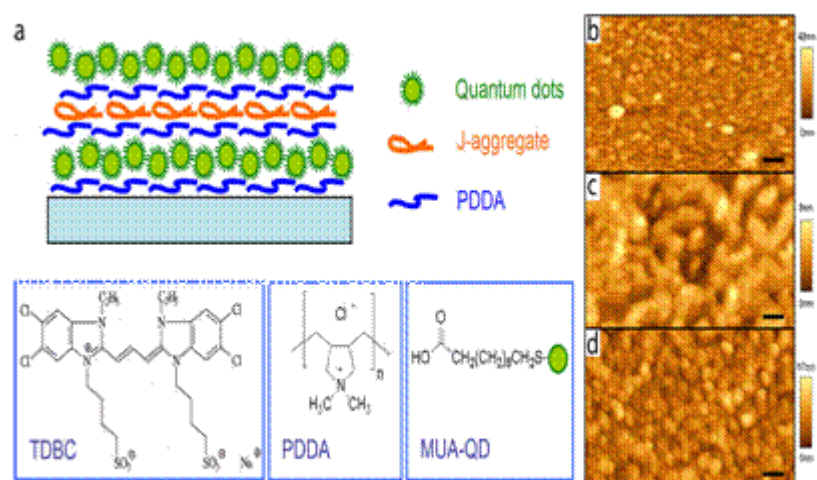


Рис. 4. Возможность создания таких структур отражает высокий уровень современной нанотехнологии.

Литература

1. V.M.Agranovich et al., J. Phys.: Cond.Matter 10, 9369 (1998);
2. V.M.Agranovich, F.Bassani (eds), "Electronic Excitation in Organic Based Nanostructures" (Elsevier, Amsterdam, 2003);
3. V.M.Agranovich, "Hybrid Organic-Inorganic Nanostructures and Light-Matter Interaction", in: Problems of Condensed Matter Physics (Eds. A.L.Ivanov, S.G.Tikhodeev, Clarendon Press, Oxford, 2007) p. 24-42;
4. V.M. Agranovich, "Excitations in Organic Solids" (Clarendon Press, Oxford, 2008, in press);
5. 2. V.M.Agranovich et al. Synth.Metals, 116, 349 (2001).
6. 3. R.F.Oulton et al. Semicond.Sci.Technol. 18, 419 (2003).
7. 4. V.M.Agranovich et al. Solid State Commun. 102, 631 (1997).
5. Holmes, R. J. et al. *Phys. Rev. B* 74, 235211 (2006).
6. Wenus, J et al, *Phys. Rev. B* 74, 235212 (2006).
7. G.Heliotis et al., *Adv.Mater* 18, 334 (2006).
8. S.Blumstengel et al., *Phys.Rev.Lett.* 97, 232401 (2006).
9. G.Itskos et al., *Phys.Rev.* B76, 035344 (2007).
10. Q.Zhang et al., *Nature Nano* 2, 555 (2007).

Экситонные поляритоны в органических микрорезонаторах

М.Л.Литинская

Поляритонами называются квазичастицы в твердом теле, описывающие распространение электромагнитных волн вблизи резонансных частот тела [1,2]. Влияние электромагнитного поля на поляризацию тела и ответное влияние поляризации на электромагнитное поле можно описать как взаимодействие между "голым" фотоном и "голым" возбуждением среды (экситоном). Если это взаимодействие сильнее, чем потери в среде, то в области резонанса между световой модой и экситоном возникают две ветви возбуждений (верхний и нижний поляритоны), разделенные щелью. Такая ситуация называется режимом сильной связи между светом и экситоном. В случае однородной изотропной среды закон дисперсии поляритонов определяется уравнением:

$$(E - E_{phot}(k))(E - E_{exc}(k)) = \Delta^2, \quad (1)$$

где $E_{phot}(k)$ и $E_{exc}(k)$ – законы дисперсии фотона и экситона, $E = E_{\rho}(k)$, $\rho = U, L$ – энергии поляритонов, а Δ – константа связи.

В 1992 году поляритоны впервые наблюдали в микрорезонаторе – структуре, состоящей из квазидвумерной пленки полупроводника (квантовой ямы), заключенной между двумя плоскими зеркалами [3]. С тех пор изучению двумерных (описываемых двумерным волновым вектором) поляритонов в микрорезонаторах уделялось много внимания. В последнее время широко обсуждается возможность создания поляритонного лазера [4] и осуществления фазового перехода, подобного Бозе-Эйнштейновской конденсации поляритонов: при определенных условиях в нижайшем энергетическом состоянии спонтанно собирается макроскопическое количество квазичастиц [5].

1. Не так давно удалось реализовать поляритоны в органических структурах. Как было показано в [6], в некоторых органических материалах экситон Френкеля имеет большую силу осциллятора, и щель 2Δ между поляритонными ветвями может оказаться на порядок больше, чем в

неорганических структурах. В отличие от низкотемпературных неорганических поляритонов, органические поляритоны стабильны при комнатной температуре. Первые органические образцы, в которых удалось осуществить режим сильной связи между фотонами и электронными переходами, представляли собой сильно неупорядоченные, но однородные в среднем, структуры на основе J агрегатов красителей цианина с щелью $2\Delta \sim 80\text{--}500\text{ meV}$ [7]. Каждый J агрегат приближенно характеризуется одним электронным переходом, дипольный момент которого направлен вдоль цепочки; остальные переходы имеют очень маленькую силу осциллятора. Характерные размеры J агрегата много меньше длины волны света в микрорезонаторе, поэтому каждый J агрегат можно рассматривать как точечную двухуровневую молекулу (так мы их и будем называть в дальнейшем). Молекулы хаотически расположены в объеме микрорезонатора, дипольные моменты переходов случайным образом ориентированы в его плоскости, а флуктуации в параметрах J агрегатов приводят к тому, что энергии электронных переходов E_j заметно отличаются от молекулы к молекуле.

Из-за сильного беспорядка в электронной подсистеме спектр возбуждений состоит из состояний, подобных плоским волнам, и из локализованных состояний, причем последние образуют 95 % спектра возбуждений [8]. Образование и локализацию состояний можно качественно объяснить следующим образом. Поскольку среднее расстояние между молекулами в матрице ~ 200 ангстрем, то молекулы взаимодействуют между собой очень слабо, и электронную подсистему можно считать некогерентной (возбуждения электронной подсистемы близки к несвязанным между собой возбуждениям отдельных молекул). Все молекулы независимо взаимодействуют с фотоном микрорезонатора. При этом образуются состояния, которые можно приближенно характеризовать двумерным волновым вектором $\mathbf{q}$, поскольку система в среднем однородна. Присутствующие в системе неоднородности приводят к упругому рассеянию поляритонов, так что у волнового вектора возникает уширение δq . Классифицировать состояния в терминах волнового вектора имеет смысл только если $\delta q < q$. Это условие выполняется при $q_{\min}^{(L)} < q < q_{\max}^{(L)}$ для нижнего поляритона, и при $q > q_{\min}^{(U)}$ для верхнего поляритона [8]; значения граничных точек определяются параметрами образца. Остальные возбуждения являются локализованными состояниями, т.к. рост δq соответствует уменьшению объема, занимаемого состоянием. Спектр возбуждений в неупорядоченном микрорезонаторе показан на рис. 1а.

Положения граничных точек и причина возникновения уширения δq могут быть определены аналитически [9]. В большинстве случаев главным механизмом упругого рассеяния оказывается рассеяние поляритонов на молекулах, имеющих электронный переход с энергией, равной энергии поляритона (резонансное рассеяние). Состояния нижней и верхней ветви с энергиями, меньшими $E_L(q_{\min}^{(L)})$ и $E_U(q_{\min}^{(U)})$ – поляритоны, локализованные на расстоянии, меньшем длины волны. Поэтому $q_{\min}^{(L)}$ и $q_{\min}^{(U)}$ следует интерпретировать как точки перехода к режиму сильной (Андерсоновской) локализации поляритонов (эти состояния обозначены “loc” на рис. 1) [10].

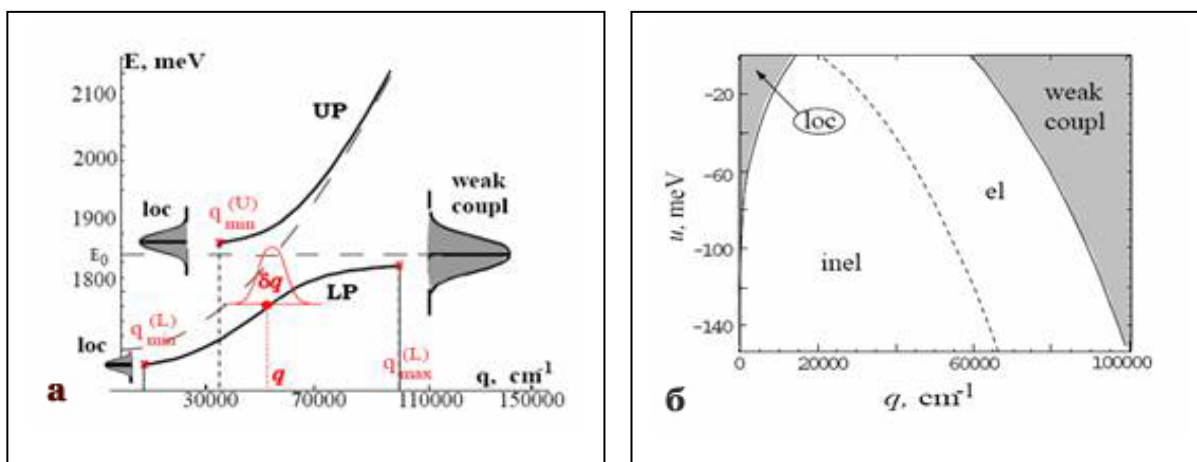


Рис. 1. (а) Спектр возбуждений в неупорядоченном микрорезонаторе. Сплошные линии – состояния, подобные плоским волнам; UP и LP обозначают верхнюю и нижнюю поляритонные ветви. Серым показаны локализованные состояния. (б) Зависимость числа состояний каждого вида от внешних параметров (отстройки и волнового вектора падающего света). В области “el” упругое рассеяние преобладает над сбоем фазы и возможна слабая локализация поляритонов. В области “inel” преобладает неупругое рассеяние.

Состояния нижней ветви с энергией выше, чем $E_L(q_{\max}^{(L)})$, уже трудно назвать поляритонными, поскольку фотоны с большими волновыми векторами выходят из резонанса с электронными переходами молекул. Поэтому $q_{\max}^{(L)}$ можно интерпретировать как приблизительный конец поляритонной области спектра и переход к режиму слабой связи между электронными возбуждениями и светом (эти состояния обозначены “weak coupl” на рис. 1).

На рис. 1b показана зависимость $q_{\max}^{(L)}$ и $q_{\min}^{(L)}$ (сплошные линии) от двух внешних параметров: волнового вектора в плоскости микрорезонатора q (он определяется углом падения света) и отстройки u ($u = E_c - E_0$, где E_0 – средняя энергия электронного перехода, а E_c – энергия фотона при $q=0$). Серая часть диаграммы изображает локализованные состояния обоих видов, а белая – состояния, которые можно описывать с помощью волнового вектора. В этой области можно сравнить длину свободного пробега поляритона по отношению к упругим рассеяниям $l_{res}(q) \sim 1/\delta q$ с длиной сбоя фазы $l_{inel}(q) = v_g(q)\hbar/\Gamma_{hom}(q)$, где $v_g(q)$ – групповая скорость поляритона, а $\Gamma_{hom}(q)$ – однородная ширина поляритона, определяющаяся в основном качеством зеркал микрорезонатора. Результат сравнения показан на рис. 1b штриховой линией. В достаточно широком интервале параметров выполняется условие $l_{res} < l_{inel}$, а значит, возможна слабая локализация поляритонов [11].

Такой состав спектра возбуждений приводит к некоторым особенностям релаксации энергии после нерезонансного возбуждения в неупорядоченных органических микрорезонаторах [8]. Переданная телу энергия релаксирует в нижайшие электронные возбужденные состояния с энергиями E_j , локализованные на отдельных молекулах. Далее, либо молекула испускает свет частоты $\omega = E_j/\hbar$ и резонансно накачивает поляритонные состояния, либо может произойти переход в состояние у дна поляритонной зоны с испусканием оптического фона или кванта внутримолекулярной вибрации. Эффективность каждого из этих двух процессов определяется временем жизни молекулы по отношению к нему. Время

жизни молекулы по отношению к испусканию кванта света составляет десятки пикосекунд, а по отношению к испусканию оптического фонона $\sim 9 - 25$ пикосекунд [12]. Следовательно, релаксация с большим (~ 70 meV) сбросом энергии, впервые предложенная в [6], действительно может конкурировать с радиационными процессами затухания. Этот факт важен, поскольку такая одношаговая релаксация может помочь преодолеть “бутылочное горлышко” [13] и привести к возможности релаксации поляритонов ко дну зоны в режиме относительно слабо взаимодействующих поляритонов.

2. Экситонные поляритоны можно наблюдать также и в микрорезонаторах, использующих монокристаллы типа антрацена или нафталина в качестве резонансного материала [14]. В этих кристаллах существуют выделенные направления, задаваемые фиксированными направлениями дипольных моментов молекул кристалла. Поскольку константа экситон-фотонной связи определяется скалярным произведением электрического поля и дипольного момента, можно ожидать, что величина константы связи будет зависеть от направления распространения поляритона. Кроме того, энергии экситонов также зависят от направления. В частности, в объемном кристалле энергия экситона даже не является аналитической функцией волнового вектора при $q \rightarrow 0$ [1].

Закон дисперсии поляритонов в кристаллическом микрорезонаторе был получен из уравнений Максвелла в работе [15] и позже из микроскопической теории в работе [16]. Энергии поляритонов при малых q оказались практически изотропными функциями волнового вектора. Причина этого состоит в следующем. Энергия экситона в пленке оказывается аналитической функцией волнового вектора благодаря пониженной размерности пространства (в двумерной пленке дипольные суммы сходятся быстрее, чем в объемном кристалле), и зависимость энергии экситона от направления оказывается относительно невелика. Кроме того, оказывается, что для любого направления волнового вектора $\mathbf{q}$ относительно дипольного момента $\mathbf{P}$ полное электрическое поле $\mathbf{E}$ есть такая комбинация TE - и TM -мод, что полное поле $\mathbf{E}$ почти параллельно $\mathbf{P}$. Поэтому при изменении направления волнового вектора меняются доли TE - и TM -мод в полном электрическом поле, но не скалярное произведение $\mathbf{PE}$, определяющее константу связи. Получается неожиданный результат: почти изотропная дисперсия квазичастицы в сильно анизотропной среде.

Исследования нелинейных свойств поляритонов в кристаллических органических микрорезонаторах только начинаются. В частности, задача о кинематическом взаимодействии двумерных поляритонов была сформулирована в [17] и решена в [18] с помощью преобразования Аграновича-Тошича [19], позволяющего заменить паулионные экситонные операторы бозе-операторами ценой дополнительных членов, появляющихся в гамильтониане. Оказалось, что описание существенно зависит от того, допускает ли закон сохранения энергии рассеяние исходных поляритонов в экситоноподобную область нижней ветви. В этой области плотность состояний в $m^*/\mu \sim 10^6$ раз больше, чем в поляритонной области спектра (m^* и $\mu = \pi^2 \hbar^2 / L_c^2 E_c$ – эффективные массы экситона и двумерного фотона). Если рассеяние в экситоноподобную область спектра возможно, то оно доминирует, поскольку эффективность рассеяния пропорциональна числу конечных состояний. Такое рассеяние невозможно описать как возмущение (амплитуда рассеяния имеет большую мнимую часть). При определенных волновых векторах амплитуда рассеяния имеет комплексный полюс, соответствующий рассеянию входящих поляритонов в связанное биэкситонное состояние. Если же рассеяние в экситонные состояния с большими q невозможно (как это всегда бывает, например, если оба взаимодействующих

поляритона принадлежат нижней ветви), то кинематическое взаимодействие можно учесть по теории возмущений, вводя эффективный потенциал, величина которого оказывается порядка ширины экситонной зоны и соответствующий отталкиванию между поляритонами.

Литература

- [1] В. М. Агранович, “Теория экситонов” (Наука, Москва, 1968).
- [2] В. М. Агранович, В. Л. Гинзбург, “Кристаллооптика с учетом пространственной дисперсии и теория экситонов” (Наука, Москва, 1979).
- [3] C. Weisbuch, M. Nishioka, A. Ishikawa, Y. Arakawa, Phys. Rev. Lett. **69**, 3314 (1992).
- [4] A. V. Kavokin, G. Malpuech, “Cavity Polaritons” (Elsevier, 2003).
- [5] J. Kasprzak *et al.*, Nature, **443**, 409 (2006).
- [6] V. M. Agranovich, H. Benisty, C. Weisbuch, Solid State Comm. **102**, 631 (1997).
- [7] D. G. Lidzey, D. D. C. Bradley, T. Virgili, A. Armitage, M. S. Skolnick, S. Walker, Phys. Rev. Lett. **82**, 3316 (1999). См. также обзор D. G. Lidzey, in “Thin films and nanostructures”, edited by V. M. Agranovich and F. Bassani (Elsevier, New York, 2003), v. 31, chap. 8.
- [8] V. M. Agranovich, M. Litinskaia, D. G. Lidzey, Phys. Rev. B, **67**, 085311 (2003);
- [9] M. Litinskaya, P. Reineker, Phys. Rev. B, **74**, 165320 (2006).
- [10] P. Michetti, G. C. La Rocca, Phys. Rev. B, **71**, 115320 (2005); V. M. Agranovich, Yu. N. Gartshstein, Phys. Rev. B, **75**, 075302 (2007).
- [11] M. Litinskaya, Phys. Lett. A, **372**, 3898 (2008).
- [12] M. Litinskaya, P. Reineker, V. M. Agranovich; J. Lumin. **110**, 364 (2004).
- [13] F. Tassone, C. Piermarocchi, V. Savona, A. Quattropani, P. Schwendimann, Phys. Rev. B, **56**, 7554 (1997).
- [14] S. Kéna-Cohen, S. R. Forrest, манускрипт подготавливается к печати.
- [15] M. Litinskaya, P. Reineker, V. M. Agranovich, Phys. Stat. Sol. (a) **201**, 646 (2004).
- [16] H. Zoubi, G. C. La Rocca, Phys. Rev. B **71**, 235316 (2005).
- [17] H. Zoubi, G. C. La Rocca, Phys. Rev. B, **72**, 125306 (2005) и Phys. Rev. B **77**, 159905 (2008).
- [18] M. Litinskaya, Phys. Rev. B **77**, 155325 (2008).
- [19] V. M. Agranovich and B. S. Toshich, Sov. Phys. JETP **26**, 104 (1968).

Самоструктурирование неупорядоченных сред в световом поле

Б.П. Антонюк

Обнаруженное нами самоструктурирование случайных сред в поле однородной световой волны открывает удивительные возможности управления свойствами вещества. Появляются новые способы манипулирования стеклами, аморфными полупроводниками, керамиками, используя для этого такой инструмент, как световой луч. Можете ли Вы представить себе, дорогой читатель, что лазерный луч диаметром в несколько миллиметров разрезает образец плавленого кварца на калиброванные шары диаметром 2 микрона? Это нам удалось сделать, используя самоструктурирование, а полученные шары как раз и представляют собой наведенную однородным светом структуру.

А может ли такой луч просверлить длинные отверстия с диаметром много меньшим диаметра пучка? Оказывается – может ! Нам удалось получить отверстия сантиметровой длины с диаметром вплоть до двух микрон при помощи лазерного луча диаметром 2 миллиметра. Формирование таких каналов тоже является самоструктурированием и является примером тонкой манипуляции, использующей свет и понимание эффектов самоорганизации под его воздействием.

Макроскопическую сверхструктуру веществу можно навязать создав предварительно специальную структуру светового поля. Широко применяется, например, сведение под углом двух когерентных волн при котором образуется решетка интенсивности света, формирующая в среде соответствующую решетку коэффициента преломления. Такой способ является прямым и хорошо исследованным, мы будем называть его структурированием, чтобы отличать от самоструктурирования вещества, возникающее при однородном освещении. Самоструктурирование отражает внутренние свойства среды, масштаб возникающей структуры никак не связан с масштабами светового поля (длиной волны, длиной когерентности, размерами пучка и пр.). Существует глубокая аналогия между самоструктурированием и колебанием скрипичной струны под действием смычка, движущегося с постоянной скоростью: смычок формирует упорядоченную во времени структуру (автоколебания), временной период которой от смычка не зависит. Точно так же пространственный период сформированной светом структуры не зависит от характеристик света.

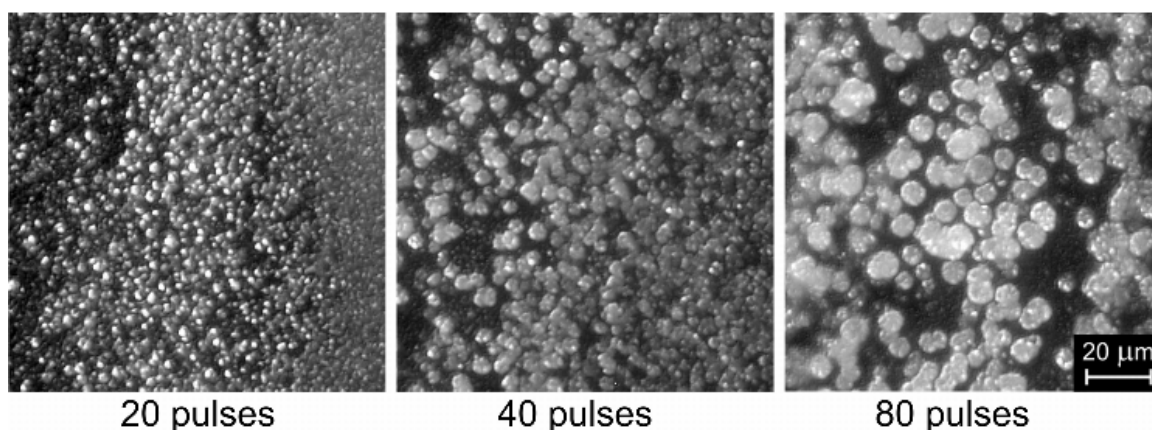


Рис. 1. Вырезание шаров.

Чтобы убедиться, что в нашем случае упорядоченную структуру формирует пространственно однородное излучение, мы применили простой тест: образец покачивался во время его обработки светом перпендикулярно оси пучка. Было найдено, что такое покачивание никак не влияет на формирование структуры. В случае же если структура наведена профилированным светом, она, очевидно, смажется движением, так как при приготовлении состояния максимумы плотности световой энергии попадают все время в разные участки образца

Теория и эксперименты показали, что сильная световая волна приводит к эффективному притяжению между электронами. Однородное распределение электронов и дырок становится неустойчивым и образуются их сгустки. Электрическим поле на их границах достигает величины 10^7 В/см. В этих областях становится эффективным поглощение кванта света с энергией немного меньшей “щели” (эффект Франца-Келдыша) с рождением электронов и дырок в свободном состоянии. Такой свет разрывает связи только в области границ, обнаруживая тем самым образовавшуюся доменную электрон – дырочную структуру. Свет, таким образом, вырезает калиброванные по размеру шары и выбрасывает их из кратера. Вдали от кратера наблюдаются отдельные шары

диаметром 2 микрона, рядом с ним, где концентрация шаров велика, начинается их коагуляция (рис. 1). Дно кратера представляет собой плотно упакованную систему полусфер диаметром 2 микрона и с таким же расстоянием между ними.

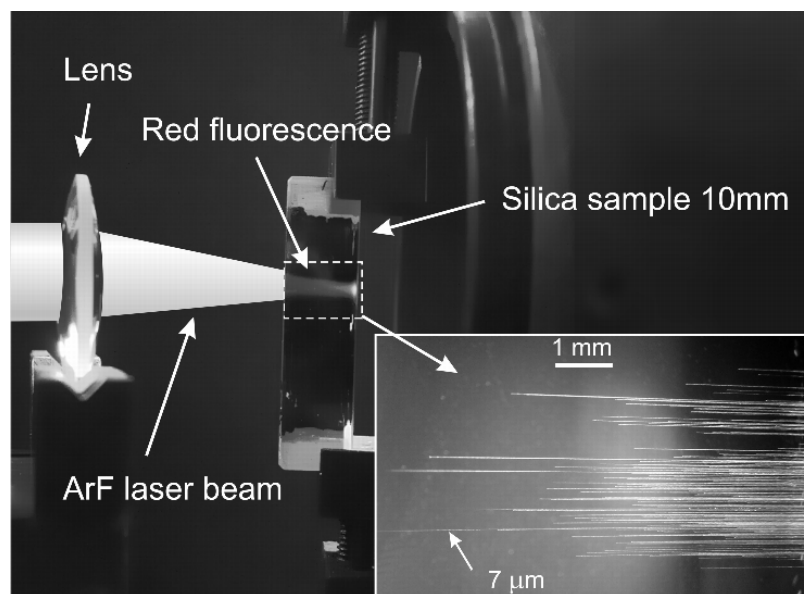


Рис. 2. Формирование каналов.

С понижением интенсивности света за время импульса успевает произойти перенос электронов лишь по направлению поляризации волны (для нашего излучения она хатична в плоскости, перпендикулярной волновому вектору $\mathbf{k}$), поэтому система одномеризуется и свет вырезает каналы, направленные по $\mathbf{k}$ (рис. 2). Наблюдаются каналы минимального диаметра 2 микрона и их сгустки.

Использовались образцы плавленого кварца *KU-1* толщиной 1–10 мм. Излучение эксимерного *ArF* лазера с длиной волны 193 нм фокусировалось на поверхность, через которую излучение выходит из образца, линзами из MgF_2 . Лазер генерировал импульсы длительностью 20 нсек, с энергией 350 мдж и частотой повторения 100 гц. Абляция наблюдалась в воздухе или герметичной камере, заполненной азотом или откачанной.

Литература

1. Antonyuk, B.P., "Light driven self-organization", Nova Science Inc. New-York 2003.
2. Antonyuk, B.P., "Strong effects of weak electron-phonon coupling", Nova Science Inc. New-York 2004.
3. Antonyuk, B.P., Obidin, A.Z., Vartapetov, S.K., Lapshin, K.E. "Site selective bond breaking in random media", Opt. Comm. **281** 191 (2008).
4. Antonyuk, B.P., Obidin, A.Z., Vartapetov, S.K., Lapshin, K.E. "Light driven self-drilling in glasses", Opt. Comm. **281** 2139 (2008).
5. Antonyuk, B.P., Obidin, A.Z., Vartapetov, S.K., Lapshin, K.E. "Light driven self-ordering in fused quartz", J. Mod. Opt. **55** 55 (2008).

Спинтроника

А.Г.Мальшуков

Изучение спинного транспорта в полупроводниковых квантовых ямах началось в теоретическом отделе еще задолго до того, как эта проблема повсеместно привлекла к себе огромное внимание. Так, при исследовании

эффектов слабой локализации в квантовых ямах нецентросимметричных полупроводников нами было показано, что квантовые поправки к коэффициентам диффузии спиновой плотности и плотности частиц имеют противоположные знаки [1]. Наши результаты по слабо локализационному магнетосопротивлению были потом подтверждены экспериментально.

В последнее время основное внимание уделялось исследованию спинового транспорта под действием электрического поля. Такого рода эффекты обусловлены относительно сильным спин-орбитальным взаимодействием в квантовых ямах полупроводников с узкой запрещенной зоной. С практической точки зрения они позволяют управлять потоками поляризации электронов, не прибегая к помощи магнитных полей, или магнитных сред. В частности, нами было исследовано накопление спиновой поляризации у границ квантовой ямы, в условиях спинового эффекта Холла [2]. Было также показано, что электрический ток, протекающий вдоль квантовой ямы нецентросимметричного полупроводника, способен навести дипольное распределение спиновой поляризации вокруг точечного рассеивателя электронов [3], в чём то аналогичное электрическому диполю Ландауера. Известной особенностью спин-орбитального взаимодействия в полупроводниках является его зависимость от деформации кристаллической решетки. Нами показано, что это свойство может быть использовано для детектирования потока спиновой поляризации. Протекая через наномеханический резонатор спиновый ток способен вызвать торсионную деформацию стержня, достаточно сильную, чтобы её наблюдать экспериментально [4]. Помимо этих работ проводились исследования спиновой релаксации и спиновой диффузии, а также эффекта Ааронова-Кашера в мезоскопических кольцах. Также нами было предсказана возможность генерации спиновой поляризации и циркулярно поляризованных фотонов при рекомбинации электронов и дырок в несущих ток квантовых ямах. Данный эффект позднее использовался при экспериментальном обнаружении спинового эффекта Холла.

Литература

1. A.G.Mal'shukov, K.A.Chao , M. Willander, Phys. Rev. Lett. 76, 3794, (1996)
2. A.G.Mal'shukov, L.Y.Wang, C.S. Chu, K.A.Chao, Phys. Rev. Lett. 95, 146601 (2005)
3. A.G. Mal'shukov, C.S. Chu, Phys. Rev. Lett. 97, 076601, (2006)
4. A.G.Mal'shukov, C.S.Tang, C.S. Chu, K.A.Chao, Phys. Rev. Lett. 95, 107203 (2005)

Нелинейные волны в бозе-эйнштейновском конденсате

А.М. Камчатнов

Вскоре после экспериментального обнаружения в 1995 году бозе-эйнштейновского конденсата (БЭК) стало ясно, что он имеет чрезвычайно богатую нелинейную волновую динамику, поскольку обладает как дисперсионными свойствами вследствие квантово-механического поведения составляющих его ультра-холодных атомов, так и нелинейными свойствами вследствие взаимодействия атомов друг с другом. Благодаря этому, в бозе-эйнштейновском конденсате были обнаружены такие нелинейные структуры, как солитоны и вихри. В последние годы в Теоретическом отделе ИСАН была проведена большая работа по исследованию нелинейной динамики БЭК, причём особое внимание было уделено теории дисперсионных ударных волн в конденсате. Такого рода волны являются дисперсионным аналогом хорошо известных диссипативных

(вязких) ударных волн для случая сред, в которых эффекты дисперсии существенно превышают вязкие эффекты, и именно такого рода средой является бозе-эйнштейновский конденсат. Как известно, динамика БЭК хорошо описывается уравнением Гросса-Питаевского

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \Delta \psi + V_{ext}(\mathbf{r})\psi + g|\psi|^2 \psi$$

для волновой функции конденсата ψ . При этом квадрат её модуля $n = |\psi|^2$ равен плотности атомов в конденсате, а градиент фазы ψ описывает скорость течения квантового газа. Параметр g характеризует взаимодействие атомов конденсата друг с другом, а V_{ext} является потенциалом внешних сил. Размер нелинейных возбуждений (солитонов или вихрей) в конденсате характеризуется параметром

$$\xi = \frac{\hbar}{\sqrt{2mgn}},$$

а линейные волны с длиной волны много больше ξ распространяются со скоростью звука

$$c_s = \sqrt{\frac{gn}{m}}.$$

Характер течения определяется числом Маха, определяемым как отношение скорости течения к скорости звука:

$$M = \frac{u}{c_s}.$$

Для выяснения основных свойств динамики конденсата при его течении было проведено численное моделирование процесса, результаты которого показаны на рис.1.

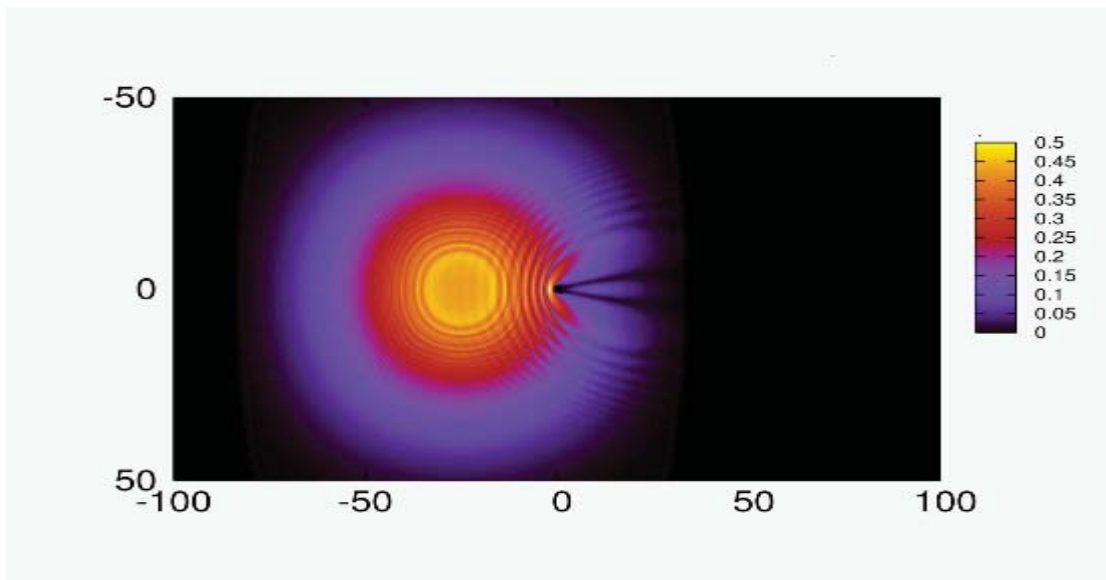


Рис. 1. Волновые структуры, возникающие при течении конденсата: (1) цилиндрически симметричная ударная волна, (2) порождаемые препятствием «корабельные» волны вне конуса Маха, (3) пара тёмных солитонов внутри конуса Маха.

Начальное распределение плотности имело возвышение в центре, которое в результате эволюции образовало дисперсионную ударную волну в виде концентрических колебаний плотности. Кроме того, на пути течения конденсата было поставлено препятствие (на эксперименте оно реализуется усреднённым

потенциалом лазерного луча), и оно порождает волны двух типов: вне конуса Маха имеются параболо-подобные линейные волны, а внутри конуса Маха находится пара тёмных солитонов, причём конусу Маха отвечают линии, проведённые под углом θ к направлению течения, где

$$\sin \theta = \frac{1}{M}.$$

В Теоретическом отделе было развито теоретическое описание всех трёх типов волн.

1. Распространяющиеся от центра ударные волны могут быть представлены в виде промодулированной цилиндрически симметричной нелинейной волны. На участке с достаточно малой кривизной фронта волна с хорошей точностью может считаться плоской. Для этого случая был развит метод Уизема применительно к уравнению Гросса-Питаевского и рассчитаны основные параметры ударной волны (амплитуды составляющих её солитонов, скорости переднего и заднего фронтов). Результаты находятся в хорошем согласии с результатами численного моделирования [1].

2. Теория линейной волновой структуры, расположенной вне конуса Маха, была развита [2,3] по аналогии с теорией Кельвина для «корабельных» волн, образуемых судном, движущимся по глубокой воде.

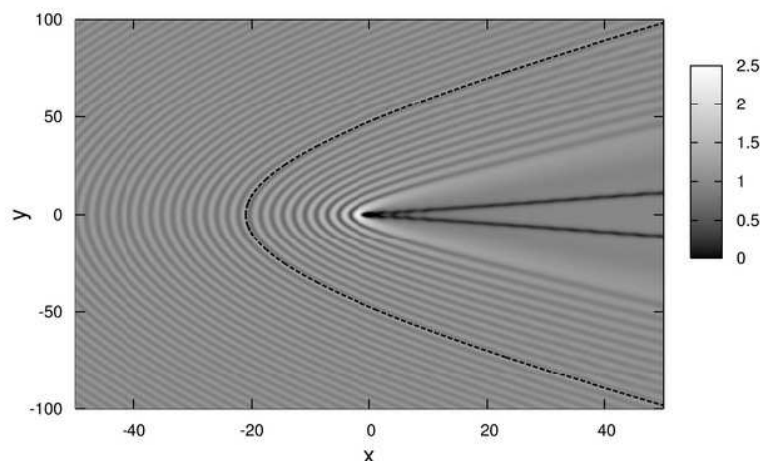


Рис. 2. Численно рассчитанная волновая структура для двумерного течения конденсата мимо препятствия с числом Маха $M = u/c_s = 2$; скорость течения u направлена слева направо и препятствие расположено в начале координат. Штриховая линия соответствует аналитически рассчитанному гребню волны.

В основу был положен закон дисперсии Боголюбова для линейных волн в конденсате. Теория даёт простые формулы для формы гребней волн. На рис.2 показано сравнение аналитической формы гребня с численно рассчитанной структурой. Очевидно, что они хорошо согласуются друг с другом. Были получены также выражения для амплитуды волны как вдали от конуса Маха, так и в его окрестности, которые также хорошо согласуются с результатами численных расчётов.

3. Тёмные солитоны, расположенные внутри конуса Маха, описываются точными решениями уравнения Гросса-Питаевского, которые были изучены в [4-6]. Сравнение аналитического профиля плотности конденсата поперёк солитона с численно рассчитанной структурой показывает, что при достаточно больших временах и достаточно далеко от препятствия численный профиль стремится

асимптотически к аналитическому профилю. Такая эволюция профиля проиллюстрирована на рис. 3.

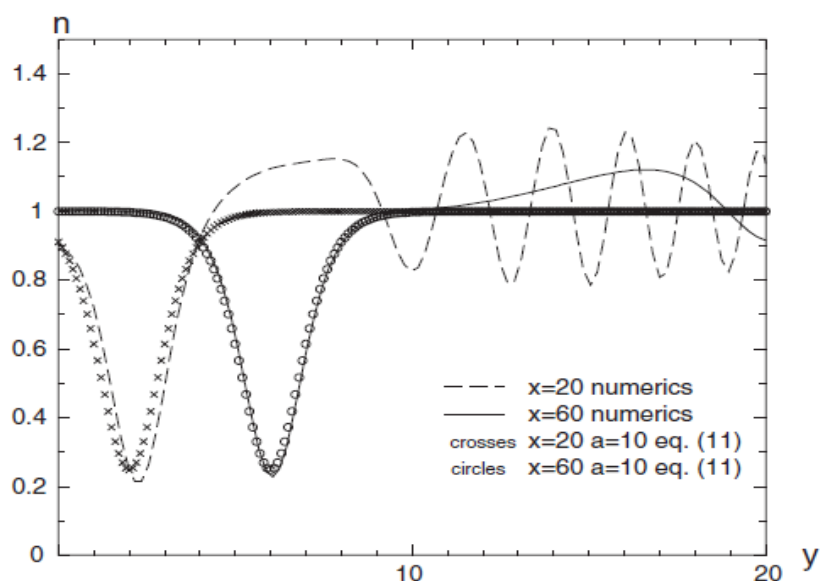


Рис. 3. Профили плотности конденсата при $x = 20$ (штриховая линия), $x = 60$ (сплошная линия), и $y > 0$, полученные численным решением уравнения Гросса-Питаевского. Они сравниваются с аналитическими профилями как функциями от координаты y поперёк течения при тех же значениях x ($x = 20$ соответствует “крестикам” и $x = 60$ – “кружкам”).

Такой характер эволюции профиля солитона свидетельствует о его устойчивости, что контрастирует с хорошо известной неустойчивостью тёмных солитонов, генерируемых другими способами, когда конденсат на бесконечности находится в покое. В этом случае имеет место поперечная неустойчивость солитонов, приводящая в конечном счёте к их распаду на вихри. Такое различие было объяснено в [7] тем, что при образовании солитонов течением конденсата мимо препятствия имеется течение вдоль солитона, которое может «сносить» неустойчивые моды, так что абсолютная неустойчивость солитона становится конвективной. Эффективно это означает, что в системе отсчёта, где препятствие покоится, солитон оказывается устойчивым. Согласно выведенному в [7] критерию перехода от абсолютной неустойчивости к конвективной, он происходит при скоростях течения с числом Маха выше критического $M_c = 1.46$, что хорошо согласуется с результатами численного моделирования.

Таким образом, в Теоретическом отделе ИСАН был выполнен цикл работ по теории дисперсионных ударных волн в бозе-эйнштейновском конденсате. Эти работы весьма актуальны в связи с недавними экспериментами по генерации таких волн в конденсате [8] и аналогичных структур при распространении пучков света в фоторефрактивных средах [9].

Литература

1. A.M. Kamchatnov, A. Gammal, R.A. Kraenkel, Dissipationless shock waves in Bose-Einstein condensates with repulsive interaction between atoms, Phys. Rev. A **69**, 063605 (2004).

2. Yu.G. Gladush, G.A. El, A. Gammal, A.M. Kamchatnov, Radiation of linear waves in the stationary flow of a Bose-Einstein condensate past an obstacle, *Phys. Rev. A* **75**, 033619 (2007).
3. Ю.Г. Гладуш, А.М. Камчатнов, Генерация линейных волн при обтекании препятствий бозе-эйнштейновским конденсатом, *ЖЭТФ*, **132**, 589-595 (2007).
4. G.A. El, A. Gammal, A.M. Kamchatnov, Oblique dark solitons in supersonic flow of a Bose-Einstein condensate, *Phys. Rev. Lett.* **97**, 180405 (2006).
5. G.A. El, Yu.G. Gladush, A.M. Kamchatnov, Two-dimensional periodic waves in supersonic flow of a Bose-Einstein condensate, *J. Phys. A: Math. Theor.* **40**, 611-619 (2007).
6. G.A. El, A.M. Kamchatnov, Spatial dispersive shock waves generated in supersonic flow of Bose-Einstein condensate past slender body, *Phys. Lett. A*, **350**, 192-196 (2006). Erratum: *Phys. Lett. A* **352**, 554-555 (2006).
7. A.M. Kamchatnov and L.P. Pitaevskii, Stabilization of solitons generated by a supersonic flow of Bose-Einstein condensate past an obstacle, *Phys. Rev. Lett.* **100**, 160402 (2008).
8. I. Carusotto, S.X. Hu, L.A. Collins, and A. Smerzi, Bogoliubov-Cherenkov radiation in a Bose-Einstein condensate flowing against an obstacle, *Phys. Rev. Lett.* **97**, 260403 (2006).
9. W. Wan, S. Jia, and J.W. Fleischer, Dispersive superfluid-like shock waves in nonlinear optics, *Nature Physics*, **3**, 46 (2007).

Мезоскопические эффекты в низкоразмерных электронных системах

В.И.Юдсон

Одним из удивительных мезоскопических эффектов являются незатухающие токи в колечках нормальных (не сверхпроводящих) проводников, пронизанных магнитным потоком. Эти токи (так называемые, "persistent current" (PC)) - аналог "токов Ампера" в атомах, помещенных в магнитном поле. Интересно, что эти токи не являются экспоненциально малыми, несмотря на то, что длина колечка намного превышает длины свободного пробега электронов, и вероятность обойти колечко, не испытав (упругого) рассеяния, экспоненциально мала. PC существуют при типичном для мезоскопии условии – длина колечка не должна превышать длину свободного пробега по отношению к неупругому рассеянию. Это условие обычно выполняется в области суб-кельвиновых температур, где подавлены неупругие процессы, разрушающие когерентность электронных волн. Экспериментально PC были обнаружены в ансамбле медных колец (Белл Лаборатория, 1990) и в отдельных золотых петельках (ИБМ, 1991). Интригующим явилось то, что измеренные величины незатухающих токов оказались на один-два порядка больше, чем теоретически ожидаемые. Это вызвало значительный интерес к мезоскопическим явлениям в изолированных системах. В связи с этим была исследована возможность возбуждения постоянного тока в кольцах под действием высокочастотного электромагнитного поля [1]. В мезоскопических колечках, пронизанных статическим магнитным полем, величина индуцированного постоянного тока ("direct current", DC) пропорциональна интенсивности внешнего поля. Усредненная по беспорядку величина тока является периодической функцией статического магнитного потока. Существенно, что даже при относительно слабом возбуждающем поле, индуцированный постоянный ток (DC) может быть значительно больше, чем равновесный постоянный ток (PC). Благодаря такой чрезвычайной

чувствительности мезоскопических систем к внешнему воздействию, они могут рассматриваться как детекторы слабых сигналов и шумов.

Величины РС в изолированных кольцах восстанавливались из измерения аксиальной намагниченности колец, вызванной протекающим током. Любопытно, что в макроскопически однородном колечке конечной высоты (цилиндрике), пронизанном статическим магнитным потоком, вектор орбитальной намагниченности направлен не по оси колечка, а (вопреки обычной интуиции) имеет боковую компоненту [2]. Типичная величина боковой компоненты зависит от соотношения между радиусом и высотой цилиндрика и, при сравнимых размерах, является сравнимой с типичной величиной аксиальной намагниченности. Боковая намагниченность является новой, типично мезоскопической характеристикой отдельного образца. Ее направление зависит от конкретной реализации микроскопического беспорядка в данном цилиндрике и является разным для разных образцов, а значит, исчезает при усреднении по ансамблю.

Проблема нелинейного отклика мезоскопических систем на переменное внешнее поле подробно исследована в работах [3-5]. Показано [3], что динамическое (в модели невзаимодействующих электронов) описание отклика страдает сингулярностями, указывающими на неадекватность подхода. Развита последовательная кинетическая теория нелинейного отклика электронов, возбуждаемых внешним полем и взаимодействующих с фононами. Выведены общие формулы для выпрямленного тока. Из квантового кинетического уравнения получено выражение для электронной температуры, позволяющее оценить эффекты перегрева возбуждаемой электронной подсистемы [4] – то есть, получен ответ на вопрос о предельном уровне возбуждения, совместимом с существованием мезоскопических эффектов. Показано, что для внешних полей, способных возбудить DC ток, сравнимый по величине с экспериментальными данными для незатухающего РС тока, эффекты перегрева еще не приводят к диссипации, разрушающей когерентные свойства системы. Для мезоскопических колечек, находящихся в постоянном магнитном поле и подвергнутых воздействию переменного внешнего поля, найдена корреляционная функция $\langle I(F)I(F') \rangle$ текущего вдоль кольца независимого от времени тока (постоянного равновесного и выпрямленного). Показано, что симметрия этой функции по отношению к магнитному потоку F существенно зависит от спектральной ширины возбуждающего поля [5]. Зависимость от магнитного потока нечетна, если внешнее поле обладает достаточно широким спектром ("естественный" шум). Таким образом, экспериментально наблюдаемая нечетная зависимость постоянного тока от магнитного потока F совместима с гипотезой о шумовом происхождении РС. В обратном случае, для предлагаемого эксперимента с контролируемым узкополосным внешним полем, предсказывается появление четной по магнитному потоку компоненты корреляционной функции тока.

Помимо этих исследований конкретного мезоскопического явления, изучались также общие вопросы теории мезоскопических систем. В работе [6] исследовано влияние граничных условий и геометрии эффективно двумерного неупорядоченного проводника на корреляцию электронных уровней энергии. В частности, было показано, что в системе без границы (таких, как сфера, тор и т.д.) высокочастотная асимптотика двухуровневой корреляционной функции определяется исключительно топологией системы. К примеру, в системе с топологией тора корреляционная функция экспоненциально убывает с ростом разности энергии уровней. В то же время, в системе с топологией сферы корреляционная функция убывает только степенным образом. В общем случае, поведение корреляционной функции определяется характеристикой Эйлера системы. Таким образом, обнаружено еще одно удивительное свойство

мезоскопических систем: несмотря на то, что длина свободного пробега электронов мала по сравнению с размером системы, корреляции уровней энергии (которые можно измерить локально) "знают" о таких глобальных свойствах системы, как ее топология. Это не известное ранее свойство мезоскопических систем является универсальным, т.е. не зависит от микроскопических параметров модели.

Любопытная универсальность обнаружена также для рассеяния электронов на мезоскопических неоднородностях (больших по сравнению с длиной волны электронов), (например, "антидотах") в двумерных слоях. Обнаружено [7], что для широкого класса геометрических форм случайно расположенных рассеивающих объектов (а именно, выпуклых) усредненные транспортное и полное квантовое сечения рассеяния демонстрируют удивительную универсальность: их отношение не зависит от формы рассеивателей и фактически определяется только размерностью пространства. Транспортное и полное сечения рассеяния могут быть найдены в независимых измерениях проводимости образца и затухания осцилляций Шубникова-Де-Гааза в магнитном поле, соответственно.

В ранних работах [8,9] было обнаружено необычное явление неустойчивости стандартной модели (т.н., "сигма-модели") локализации электронов (фотонов, и т.п.) в случайном потенциале по отношению к учету дополнительных слагаемых с увеличенным числом производных эффективного поля. Такое поведение оказалось неожиданным, оно радикально отличается от известного факта убывания вершин с большим числом производных в теории фазовых переходов. Эта неустойчивость оказалась связанной с аномальным ростом высоких моментов мезоскопических флуктуаций проводимости (кондактанса) и плотности электронных состояний. С помощью уравнений ренормализационной группы удалось определить закон возрастания аномальных слагаемых ("зарядов"), что позволило восстановить вид асимптотик функций распределения физических величин. Полученные результаты свидетельствуют о важности флуктуаций при приближении к локализационному переходу и, возможно, указывают на необходимость выхода за рамки обычного описания локализации с помощью однопараметрического скейлинга. Возможно также, что необходимость перехода к конформным координатам для решения ренорм-групповых уравнений, является указанием на структуру будущей теории.

Работы [8,9] получили дальнейшее развитие в [10], где было предложено неизвестное ранее теоретико-полевое представление для функции распределения глобальной плотности электронных состояний в протяженных проводниках. Тем самым открывается возможность изучения полной статистики флуктуаций напрямую - без предварительного вычисления совокупности всех моментов. До последнего времени вычисление моментов было единственным известным способом изучения асимптотик функций распределения (для систем с размерностью больше единицы). Не говоря о трудностях вычисления высоких моментов, отметим, что получаемая с их помощью информация, в принципе, является косвенной и нуждается в дополнительном обосновании. Это связано с известным математическим утверждением о неоднозначности восстановления функции распределения по ее моментам. В основе нового подхода - функциональное интегрирование по би-локальным полям, вместо интегрирования по локальным полям, как в обычном представлении для моментов физических величин. Развитый формализм позволяет выполнить усреднение по беспорядку и вывести эффективный функционал для медленных степеней свободы, являющийся обобщенным аналогом функционала нелинейной сигма-модели. Как приложение теории, получена логарифмически-нормальная асимптотика функции распределения глобальной плотности электронных состояний.

Литература

- [1] V.E. Kravtsov and V.I. Yudson, Phys. Rev. Lett. **70**, 210 (1993).
- [2] V.I. Yudson, Phys. Rev. Lett. **74**, 1407 (1995).
- [3] V.I. Yudson, E. Kanzieper, and V.E. Kravtsov, Phys. Rev. B **64**, 045310 (2001).
- [4] V.I. Yudson and V.E. Kravtsov, Phys. Rev. B **67**, 155310 (2003).
- [5] V.I. Yudson, Phys. Rev. B **65**, 115309 (2002).
- [6] V.E. Kravtsov and V.I. Yudson, Phys. Rev. Lett. **82**, 157 (1999).
- [7] V.I. Yudson and D.L. Maslov, Phys. Rev. B **75**, 241408_R (2007).
- [8] В.Е. Кравцов, И.В. Лернер и В.И. Юдсон, ЖЭТФ **94**, no7, 255 (1988) [Sov. Phys. JETP **68**, 1441 (1988)].
- [9] V.E. Kravtsov, I.V. Lerner, and V.I. Yudson, Phys. Lett. A **134**, 245 (1989).
- [10] V.I. Yudson, Phys. Rev. Lett. **94**, 156601 (2005).

Эффекты взаимодействия в наноструктурах

В.И. Юдсон

В работе [1] замечено, что сильное магнитное поле, перпендикулярное двумерному электронному газу, эффективно “подавляет” кинетическую энергию и тем самым значительно облегчает условие Вигнеровской кристаллизации электронов за счет их кулоновского. Это простое качественное соображение сопровождалось большим количеством экспериментальных и теоретических исследований возможных фаз разреженного электронного газа в магнитном поле. В частности, работа [1] цитируется в знаменитой статье Tsui, Stormer and Gossard (1982) – в попытке объяснить наблюдаемый ими эффект электронной кристаллизацией (оказалось, однако, что обнаруженный в этой “нобелевской” работе “побочный продукт” поиска электронной кристаллизации является открытием дробного квантового эффекта Холла). Исследования в этой области продолжают во многих университетах и научных центрах.

В серии работ [2-6] исследована возможность бездиссипативных (сверхпроводящих) токов в системе двух параллельных близко расположенных слоев с пространственно разделенными электронами и дырками. Показано, что спаривание электронов и дырок приводит к экситонному конденсату, при этом бездиссипативное движение конденсата сопровождается незатухающими противоположно направленными потоками электронов и дырок. Всесторонне исследованы факторы, мешающие образованию конденсата (заряженные примеси, анизотропия спектра, туннельные процессы), и определены допустимые значения соответствующих параметров. Эти работы вызвали большой интерес и индуцировали последующие теоретические и экспериментальные исследования по эффектам увлечения (drag-effect) в электронно-дырочных слоях, а также по коллективным эффектам в системах оптически создаваемых “непрямых” экситонов в двойных квантовых ямах. Аналоги предсказанного явления исследуются в режиме квантового эффекта Холла в двухслойных системах, а в последнее время обсуждается и возможность их реализации в двухслойном графене.

Еще более интересное явление обсуждается в работе [8] для системы пространственно разделенных электронно-дырочных слоев вблизи металла. Показано, что в случае, когда металл находится со стороны электронного слоя, индуцированные металлом “заряды-изображения” настолько уменьшают взаимное отталкивание электронов, что становятся возможными комплексы из

нескольких электронов, связанных с одной дыркой (электронно-дырочное взаимодействие экранируется слабее, чем межэлектронное, так как дырочный слой находится дальше от металла). В случае, когда число дырок меньше, чем число электронов (что может быть достигнуто подбором приложенного к слоям напряжения), эти заряженные комплексы являются мобильными и термодинамически стабильными образованиями. Взаимное кулоновское отталкивание обеспечивает стабильность системы комплексов также по отношению к слиянию в капли. Наиболее интересным объектом является комплекс из трех электронов, связанных с одной дыркой. Это - простейший возможный заряженный бозон (заряд = $-2e$). Интерес к заряженным термодинамически стабильным бозонам связан с возможностью их бозе-конденсации. Движение заряженного бозе-конденсата сопровождалось бы сверхпроводящим током, текущим вдоль слоев (токи экситонного конденсата в электронно-дырочных слоях, описанные в предыдущем пункте, антипараллельны, так что результирующий ток вдоль двухслойной системы зануляется). Необычным было бы и поведение заряженных бозонов в магнитном поле. Экспериментальная реализация такой системы открыла бы новую страницу физики наноструктур.

В совместной экспериментально-теоретической работе [9] сообщается о наблюдении гистерезиса в циклотронном резонансе двумерного электронного газа в структурах GaAs/AlGaAs малого диаметра. Гистерезис и эффекты переключения наблюдались в поглощении пробного микроволнового поля на частоте магнето-плазмонного резонанса, возникающего в пространственно ограниченных образцах из-за коллективного кулоновского взаимодействия. Эффект наблюдался вплоть до температур 25 К и сопровождался долгоживущими изменениями плотности электронов двумерного газа. Для описания эффекта предложена модель, основанная на изменениях плотности электронного газа, обусловленных процессами вертикального электронного транспорта. В этой модели возникают явления бистабильности и гистерезиса, условие для которых соответствует физическим параметрам эксперимента. Обнаруженный эффект и его теоретическое описание указывают на важность процессов вертикального электронного транспорта в подобных структурах, которые до сих пор не принимались во внимание.

Наряду с двумерными системами, рассматривались также эффективно одномерные системы, где эффекты взаимодействия особенно существенны. Исследовалась [10] система взаимодействующих электронов в квантовой проволоке, гибридной с примесью (или квантовой точкой), которая имеет один электронный уровень с энергией вблизи энергии Ферми проволоки. Электроны проволоки описываются моделью Латтингера с правыми и левыми носителями заряда. Гибридизация с резонансным уровнем означает возможность перехода электрона из проволоки на резонансный центр с последующим возвращением в любую (т.е., как правую, так и левую) моду проволоки. Иными словами, резонансная примесь приводит к процессам перераспределения правых и левых электронов. Известно, что модель Латтингера крайне чувствительна к этим процессам, способным радикально изменить ее низкоэнергетическое поведение. С использованием ренорм-группового подхода для случая относительно слабого взаимодействия, было показано, что амплитуда прохождения имеет антирезонансный характер и описывается обобщенной формулой Брейта-Вигнера. Эффективная ширина в этой формуле неограниченно возрастает при сближении энергии уровня с энергией Ферми. Это означает, что при низких температурах гибридная примесь "разрывает" нанопроволоку на две изолированные части. Такое поведение радикально отличается от

рассматривавшегося ранее прохождения Латтингеровских электронов через двойной потенциальный барьер с резонансным уровнем (В последнем случае имеет место резонанс, эффективная ширина которого убывает с приближением энергии резонансного уровня к энергии Ферми). Таким образом, гибридизация с контролируемым электронным уровнем позволяет, в принципе, управлять транспортом электронов через нанопроволоку.

Литература

- [1] Ю.Е. Лозовик, В.И. Юдсон, Письма ЖЭТФ **22**, 26 (1975) [JETP Letters **22**, 11 (1975)].
- [2] Ю.Е. Лозовик, В.И. Юдсон, Письма ЖЭТФ **22**, 556 (1975) [JETP Letters **22**, 274 (1975)].
- [3] Ю.Е. Лозовик, В.И. Юдсон, ЖЭТФ **71**, 738 (1976) [Sov.Phys.JETP **44**, 389 (1976)].
- [4] Ю.Е. Лозовик, В.И. Юдсон, ФТТ **18**, 1962 (1976) [Sov. Phys. Sol. State **18**, 1142 (1976)].
- [5] Yu.E. Lozovik and V.I. Yudson, Sol. State Commun. **19**, 391 (1976); **21**, 211 (1977).
- [6] Ю.Е. Лозовик, В.И. Юдсон, Письма ЖЭТФ **25**, 18 (1977) [JETP Letters **25**, 14 (1977)].
- [7] Yu.E. Lozovik and V.I. Yudson, Sol. State Commun. **22**, 117 (1977)
- [8] V.I. Yudson, Phys. Rev. Lett. **77**, 1564 (1996).
- [9] B.M. Ashkinadze and V.I. Yudson, Phys. Rev. Lett., **83** 812 (1999).
- [10] I.V. Lerner, V.I. Yudson, and I.V. Yurkevich, Phys. Rev. Lett., **100**, (2008).

ЛАБОРАТОРИЯ СПЕКТРОСКОПИИ НАНОСТРУКТУР



В лабораторию входят две научные группы: теория и компьютерное моделирование (руководитель - кандидат физико-математических наук Ю.Е.Лозовик) и экспериментальная группа (старший научный сотрудник С.П.Меркулова). Вместе с аспирантами и студентами в работе лаборатории участвуют в настоящее время около 20 человек.

Работа ведется по ряду направлений нанофизики, нанотехнологии, нанофотоники, физики твердого тела, физики сверхбыстрых процессов, инициированных сверхкороткими лазерными импульсами, физики новых наноструктур и кластеров и новых кластерных материалов.

В лаборатории занимаются и рядом фундаментальных вопросов теории: бозе-конденсации, квантово-электродинамическими процессами в оптических микрополостях, топологические фазы в квантовой теории, динамика квантовых систем и т.п. Развиваются новые методы компьютерного моделирования.

Принципом работы лаборатории является сочетание аналитических расчетов, использующих возможности современного теоретического аппарата, и компьютерного моделирования методами молекулярной динамики, Монте-Карло, квантового Монте-Карло. Моделирование используется для изучения, исходя из первых принципов, сложных систем, не поддающихся аналитическому расчету из-за отсутствия малых параметров задачи. Такие компьютерные эксперименты, свободные, в отличие от физических экспериментов, от влияния искажающих результаты непринципиальных деталей, используются для проверки теоретических моделей, а также для поиска оптимальных параметров для проводимых в группе С.П.Меркуловой физических экспериментов по нанооптике и нанотехнологии.

Сотрудниками лаборатории выполнено более 300 научных работ (в том числе ряд обзоров и коллективных монографий), защищено в общей сложности около 30 кандидатских диссертаций (рук. Ю.Е.Лозовик).

Работа лаборатории выполнялась в сотрудничестве с лабораторией спектроскопии ультрабыстрых процессов и другими лабораториями ИСАН, МГУ, ИОФ РАН, Институтом химической физики, с Техническим Университетом Берлина и Университетом Гетеборга. Исследования в лаборатории спектроскопии наноструктур проводились по программе Президиума РАН «Метаматериалы», программам ОФН РАН «Квантовая макрофизика», «Физика низкоразмерных структур», «Сильно-коррелированные системы», а также грантам РФФИ.

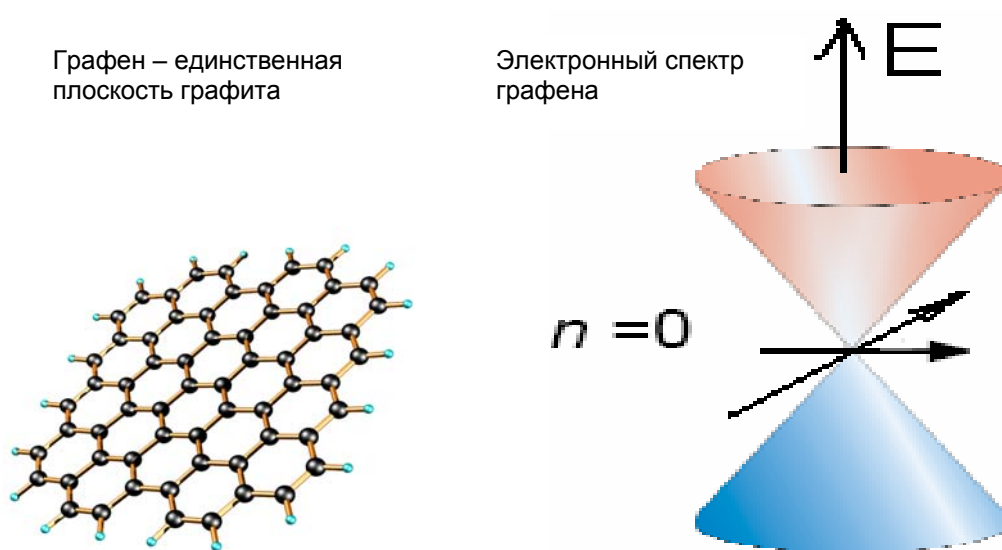
Новая наноструктура – графен

В 2004 году К.С.Новоселову, А.К.Гейму, С.В.Морозову и др. удалось отщепить от кристаллов графита слой углерода толщиной в один атом, называемый графеном [1].

Графен обеспечивает абсолютный предел миниатюризации в одном измерении и идеальным образом подходит к современным планарным технологиям

изготовления интегральных схем. С помощью нанолитографии из графена можно вырезать куски произвольной формы и устанавливать на них контактные и бесконтактные электроды.

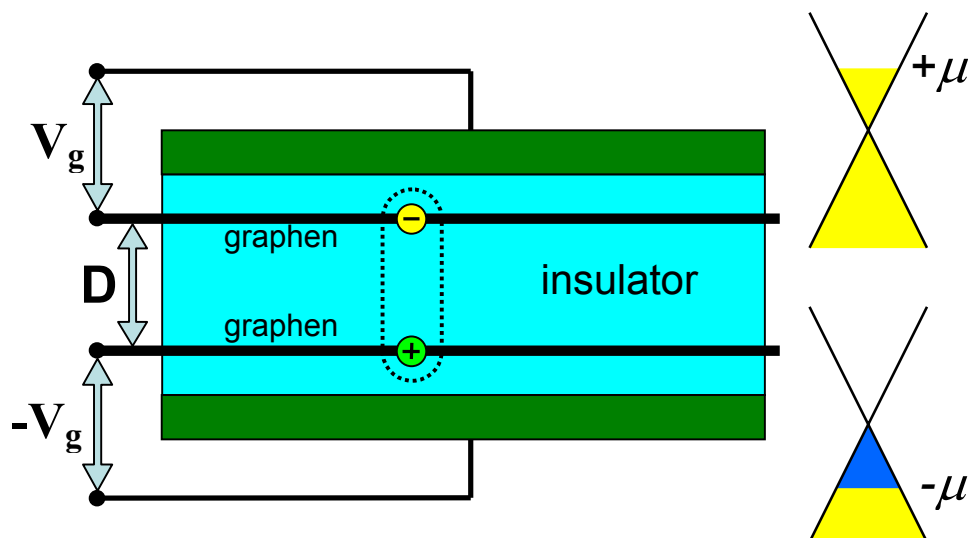
Подвижность носителей заряда в графене достигает рекордных значений, а такие явления, как квантовый эффект Холла и спиновый транспорт, наблюдались в графене даже при комнатной температуре. Все это делает графен перспективным материалом для создания будущих нанoeлектронных устройств. Графен интересен и с фундаментальной точки зрения благодаря своим уникальным электронным свойствам: вблизи уровня Ферми электроны в графене описываются двумерным уравнением Дирака для безмассовых частиц с эффективной «скоростью света» 10^6 м/с. На примере этой системы можно, фактически, изучать новый вид частиц – безмассовые заряженные фермионы, нигде больше не существующие в природе.



В Лаборатории спектроскопии наноструктур ведутся систематические исследования коллективных электронных явлений в графене и наноструктурах на его основе [2]. Характерные черты коллективных явлений в графене и в его ближайшем «нерелятивистском» аналоге – полупроводниковых квантовых ямах – имеют как сходство, так и различия. «Ультрарелятивизм» электронов в графене имеет два важных последствия. Во-первых, электроны в графене являются киральными частицами и описываются многокомпонентной волновой функцией. Во-вторых, линейное дисперсионное соотношение приводит к иному соотношению между кинетической и потенциальной энергиями системы электронов, нежели в квантовых ямах. Это позволяет реализовывать новые режимы поведения квантовой системы электронов в структурах на основе графена.

В качестве одной из таких структур нами был рассмотрен электрон-дырочный бислой – два параллельных слоя графена, в одном из которых создана некоторая концентрация электронов, а в другом – такая же концентрация дырок. Концентрация носителей заряда в каждом листе графена может регулироваться изменением величины затворного напряжения между графеном и близко расположенным электродом. Электрон-дырочный бислой оказывается неустойчивым по отношению к спариванию электронов и дырок из-за их кулоновского притяжения, которое подобно спариванию электронов в сверхпроводнике из-за обмена фононами, описываемому

теорией Бардина-Купера-Шриффера (БКШ). Было показано [3], что, несмотря на «ультрарелятивизм» электронов, задача о спаривании в бислое графена весьма похожа на аналогичную задачу для связанных квантовых ям (см. ниже). Однако, имеются и существенные отличия.



В квантовых ямах безразмерный параметр, характеризующий силу спаривания, возрастает при уменьшении концентрации частиц. При большом значении этого параметра – в режиме сильной связи – размер электрон-дырочных пар становится существенно меньше расстояния между ними, в результате чего они ведут себя как слабо отталкивающиеся бозе-частицы. При достаточно низких температурах газ локализованных пар переходит в сверхтекучее состояние. Несмотря на то, что сила спаривания велика, температура перехода в сверхтекучее состояние определяется динамикой движения пар как целого и является, как правило, очень низкой.

В графене, как оказалось, сила спаривания может регулироваться не только через концентрацию частиц, но и через диэлектрическую проницаемость окружающей среды. Если диэлектрическая проницаемость среды достаточно велика, то при сколь угодно малой концентрации сохраняется режим слабой связи, что резко отличается от ситуации в квантовых ямах. Однако, в случае малой диэлектрической проницаемости окружающей среды в эксперименте посредством изменения затворного напряжения может быть прослежен весь переход слабой к сильной связи.

В режиме сильной связи особенности электронных свойств графена дают начало любопытному эффекту. «Ультрарелятивистские» электроны и дырки не могут образовывать локализованных пар, в результате чего в бислое графена даже в режиме сильной связи будет осуществляться БКШ-спаривание. При этом температура перехода в сверхтекучее состояние может быть очень высокой, вплоть до комнатной температуры.

Возникновение БКШ-конденсата электрон-дырочных пар в бислое графена может быть обнаружено экспериментально несколькими способами. Во-первых, это регистрация эффекта кулоновского увлечения, который выражается в появлении тока в одном из слоев графена при приложении напряжения вдоль другого слоя. При переходе системы в сверхтекучее состояние коэффициент увлечения должен резко возрасти. Во-вторых, это изучение эффектов, подобных стационарному и нестационарному эффектам Джозефсона. Наконец, конденсация меняет характер

отклика системы на внешнее электромагнитное поле. В частности, приложение магнитного поля, параллельного слоям графена, ведет к появлению незатухающих токов, которые могут быть обнаружены непосредственно.

Осуществление высокотемпературной сверхтекучести в электрон-дырочном бислое графена имело бы большое практическое значение. На основе такой системы может быть построена бездиссипативная двухпроводная линия электропередачи. Эффекты Джозефсона могут быть использованы для создания высокочувствительных магнитометров, генераторов высокочастотных колебаний, СВЧ-детекторов и компактных быстродействующих транзисторов.

Еще одно коллективное явление в графене, изученное в Лаборатории, – это бозе-конденсация и сверхтекучесть магнитоэкситонов в электрон-дырочном бислое графена, помещенном в перпендикулярное магнитное поле [4]. Электроны и дырки в магнитном поле образуют локализованные пары – магнитоэкситоны – которые при достаточно сильных магнитных полях ведут себя как бозоны, взаимодействующие посредством диполь-дипольного отталкивания. Был изучен спектр коллективных звуковых возбуждений в системе магнитоэкситонов и найдена температура перехода в сверхтекучее состояние. Сверхтекучая система магнитоэкситонов, как и система с БКШ-конденсатом в отсутствие магнитного поля, должна демонстрировать кулоновское увлечение и эффекты Джозефсона. Локальные флуктуации сверхтекучей плотности выше температуры перехода в сверхтекучее состояние могут проявляться в локальных оптических и транспортных свойствах. Эффективная масса магнитоэкситона в бислое графена, не ограниченная массами составляющих его электрона и дырки (которые равны нулю), может быть сделана очень малой. А так как температура перехода в сверхтекучее состояние обратно пропорциональна массе, то изучение сверхтекучести магнитоэкситонов в бислое графена может оказаться более простым, чем в связанных квантовых ямах.

В том случае, если в магнитное поле помещена трехслойная система на основе графена с чередующимися слоями электронов и дырок, то, как было показано [5], система магнитоэкситонов оказывается неустойчивой по отношению к образованию магнитобизкситонов, представляющих собой связанные пары магнитоэкситонов с антипараллельно ориентированными дипольными моментами. Система магнитобизкситонов, в свою очередь, является устойчивой и переходит в сверхтекучее состояние при достаточно низких температурах.

Также были исследованы свойства магнитоплазмонов в графене, бислое графена и сверхрешетке параллельных слоев графена [6]. В определенных интервалах волновых векторов магнитоплазмоны демонстрируют затухание Ландау, причем в сверхрешетке нестабильность магнитоплазмонов резко усиливается по сравнению с однослойной системой благодаря синфазной суперпозиции колебаний. Этот эффект может быть использован для превращения энергии магнитоплазмонов в электромагнитное излучение терагерцового диапазона. Дополнительным преимуществом таких источников является возможность управления частотой излучения посредством напряженности магнитного поля.

Литература

- [1] K.S. Novoselov, A.K. Geim, S.V. Morozov, et al., *Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in graphene*, Nature, vol. 438, p. 197 (2004).
- [2] Ю.Е. Лозовик, С.П. Меркулова, А.А. Соколик, *Коллективные электронные явления в графене*, УФН, т. 178, № 7, 756-776(2008).

[3] Yu.E. Lozovik, A.A. Sokolik, *Electron-hole pair condensation in graphene bilayer*, Письма в ЖЭТФ, т. 87, № 1 (2008), стр. 61-65.

[4] O.L. Berman, Yu.E. Lozovik, G. Gumbs, *Bose-Einstein condensation and superfluidity of magnetoexcitons in bilayer graphene*, Phys. Rev. B, vol. 77, 155433 (2008).

[5] O.L. Berman, R.Ya. Kezerashvili, Yu.E. Lozovik, Berman OL, Kezerashvili RY, Lozovik Yu.E., Collective properties of magnetobiexcitons in quantum wells and graphene superlattices, Phys.Rev. B78, No.3, 035135(2008).

[6] O.L. Berman, G. Gumbs, Yu.E. Lozovik, *Magnetoplasmons in layered graphene structures*, Phys. Rev. B 78, 085401 (2008).

Фотонные кристаллы

Фотонные кристаллы представляют собой структуры, как правило, искусственные, с периодически меняющейся в пространстве диэлектрической проницаемостью. Периодичность диэлектрической проницаемости приводит к зонному спектру для фотонов, подобно тому, как периодический в пространстве потенциал приводит к зонному спектру для электронов. Фотонные кристаллы интересны как с фундаментальной точки зрения (например, для управления квантово-электродинамическими процессами), так и для многочисленных приложений, в основном, благодаря своему свойству не пропускать электромагнитные волны в определенном частотном диапазоне – фотонной щели, зависящей от геометрических параметров фотонного кристалла и от свойств материала. В частности, представляет интерес управление тепловым излучением с помощью фотонных кристаллов, которое может привести к существенному увеличению КПД тепловых источников света. Наряду с этим фотонные кристаллы могут быть успешно применены в качестве фильтров оптического и инфракрасного диапазонов, оптических переключателей и волноводов.

На Рис.1 представлена электронная фотография трехмерного фотонного кристалла, представляющего собой «поленицу» – периодическую систему скрещенных под прямым углом металлических прямоугольных параллелепипедов.

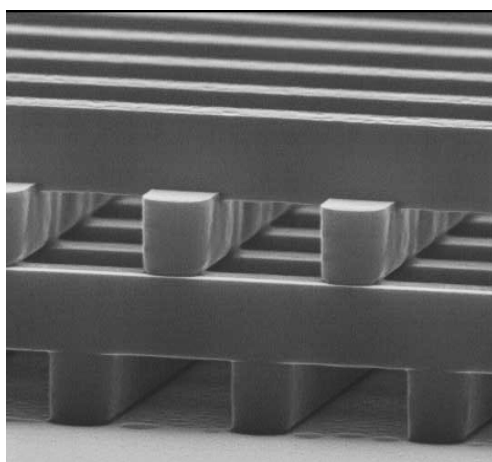


Рис. 1. Электронная фотография фотонного кристалла из металлических брусков. Расстояние между брусками – 750 nm, высота – 375 nm, толщина – 250 nm.

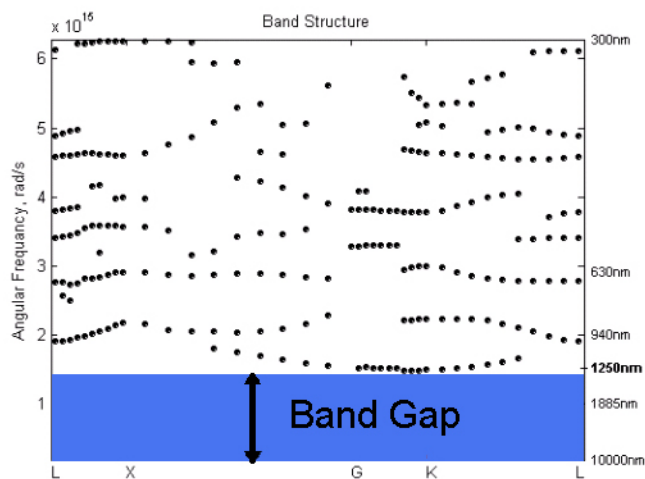


Рис. 2. Зонная структура фотонного кристалла из металлических брусков, представленного на рис.1. Материал – вольфрам. $T = 1600$ K.

Из Рис.2 видно, что имеется полная запрещенная зона в ИК диапазоне спектра вплоть до длины волны 1250 nm. Плотность фотонных состояний внутри нее равна нулю, следовательно, можно судить о том, что фотонный кристалл до этой длины волны будет обладать минимальным поглощением, таким образом, подобная фотонная решетка может быть использована для увеличения КПД тепловых, а так же световых источников излучения. Наряду с этим фотонный кристалл с данными характеристиками может быть использован при выборе соответствующих геометрических параметров как высокочастотный фильтр.

Одним из наиболее широко используемых методов расчета фотонных кристаллов является метод разложения по плоским волнам для расчета дисперсионных зависимостей фотонных кристаллов. Изначально метод позволял строить зонные структуры и предсказывать положения фотонных щелей в двумерных фотонных кристаллах, состоящих из диэлектрических материалов, затем он был модифицирован для случая металлов, диэлектрическая проницаемость которых выбиралась в виде приближения Друде. Расчеты с помощью этого метода имели хорошую предсказательную силу для длинноволнового диапазона спектра. Для расчета фотонных щелей в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах требуется более точное приближение для диэлектрической проницаемости металлов. Таким приближение является формула Друде-Лоренца, которая наиболее точно описывает поведение диэлектрической проницаемости в области длин волн от 400 до 1500 нм. Мы модифицировали метод разложения по плоским волнам в случае приближения Друде-Лоренца для расчета ширины и положения фотонных щелей в двумерных металлических фотонных кристаллах. С помощью нашей программы мы исследовали зонную структуру нескольких типов металлических фотонных кристаллов и зависимость ширины запрещенной зоны от геометрических параметров решетки (Рис. 3).

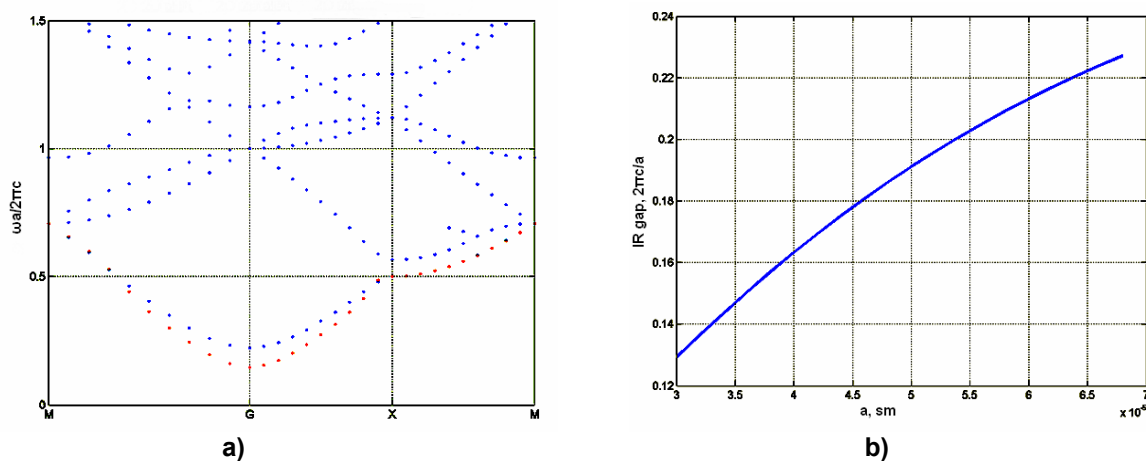


Рис. 3. а) Зонная структура двумерного металлического фотонного кристалла, рассчитанная с помощью модифицированного метода разложения по плоским волнам. Фактор заполнения металлом $f = 1\%$, период квадратной решетки 650 нм (синий), нижняя ветвь показана также для периода 350 нм (красный). б) Ширина инфракрасная фотонной щели в том же двумерном металлическом фотонном кристалле в зависимости от периода решетки a .

Может представлять большой практический интерес обнаруженный нами новый эффект для фотонного кристалла с поглощающими элементами - *резкая зависимость коэффициента поглощения фотонного кристалла от угла падения на него электромагнитной волны, связанная с пере распределением энергии внутри фотонного кристалла* (связанное с блоховским характером световых волн

внутри фотонного кристалла). Этот эффект может быть использован для оптоэлектроники. Нами была рассмотрена структура, представляющая собой 3 слоя прямого опала, образующего FCC решетку. В узлах решетки находятся вольфрамовые шарики, покрытые диэлектрическими оболочками. На Рис.4 представлен спектр поглощения такой структуры для трех разных углов падения волны.

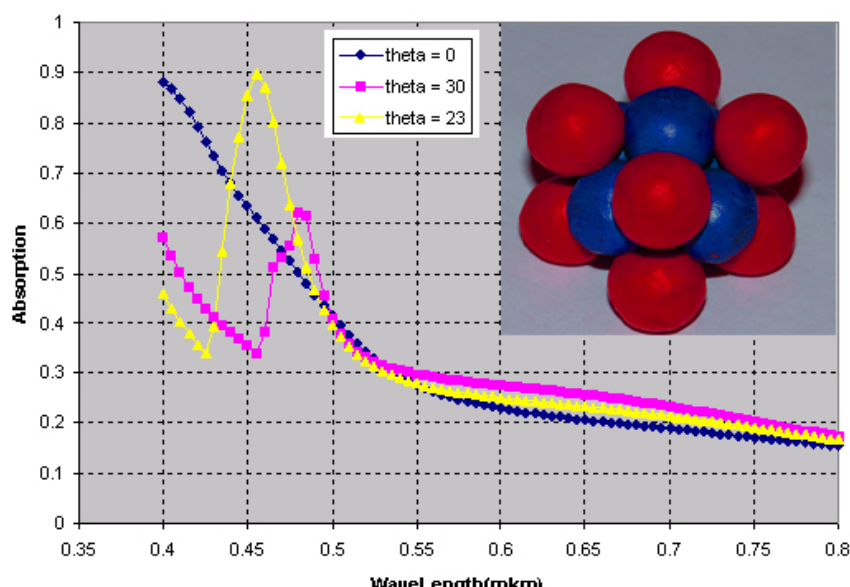


Рис. 4. Спектр поглощения трех слоев FCC опала, вырезанных перпендикулярно направлению (111).

Представлены спектры для трех различных углов падения (0, 23 и 30°). Вольфрамовые шарики одеты в диэлектрические оболочки. $\epsilon_{\text{diel}}=2.1$, вольфрам, $T=2400$ К.

Постоянная решетки $a = 500$ nm, диаметр внутренних вольфрамовых шариков $d = 100$ nm, внешних диэлектрических – $d = 200$ nm.

На вставке - FCC решетка прямого опала с плотной упаковкой.

Из Рис. 3 видно, что изменению угла падения волны в достаточно узком диапазоне соответствует резкая зависимость амплитуды пика поглощения от длины волны, в то время как нормальному падению волны соответствует гладкое спадание кривой поглощения без каких-либо особенностей. Нами было проведено построение распределения амплитуды энергии электромагнитного поля в каждом из трех слоев для двух углов $\theta=30$ и $\theta=23$ для длины волны 455 nm, соответствующей максимуму поглощения.

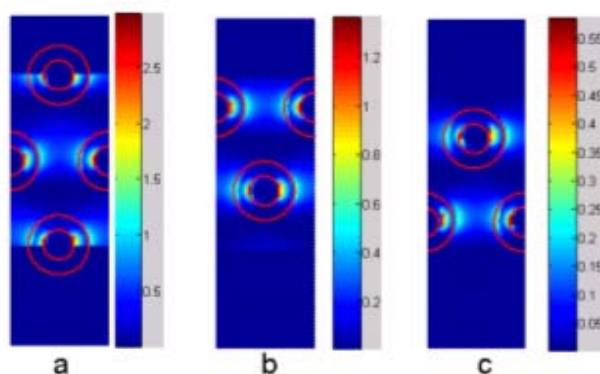


Рис. 5. Распределение энергии поля в трех слоях FCC опала для структуры, спектры которой представлены на Рис.3. Угол падения 23. Длина волны $\lambda = 455$ nm.

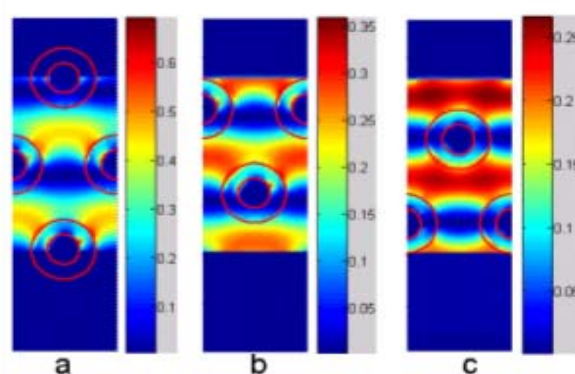


Рис. 6. Распределение энергии поля в трех слоях FCC опала для структуры, спектры которой представлены на Рис.3. Угол падения $\theta=30$. Длина волны $\lambda = 455$ nm.

Из Рис.5 и Рис.6 видно, что в максимуме поглощения, соответствующего углу падения 23° , на длине волны $\lambda = 455\text{nm}$ наблюдаются острые максимумы амплитуды энергии электромагнитного поля, локализованные на поверхности поглощающих металлических ядер. В тоже время при угле падения 30° на той же длине волны, в минимуме поглощения максимумы распределения поля во всех трех слоях локализованы в основном между элементами фотонного кристалла. Обнаруженный эффект можно рассматривать как аналог для оптических кристаллов эффекта Бормана для рентгеновского излучения в обычных кристаллах.

Нами были также изучены метаматериалы нового типа – фотонные кристаллы из сверхпроводящих элементов. Была проанализирована зонная структура сверхпроводящих фотонных кристаллов и управление ей с помощью температуры и магнитного поля, меняющих сверхпроводящую щель, а в этой связи, и диэлектрическую функцию сверхпроводника. Показано, что сверхпроводящие фотонные кристаллы имеют управляемую фотонную щель в терагерцовой области с более полным подавлением плотности фотонных состояний по сравнению с металлическими фотонными кристаллами из-за отсутствия затухания на частотах меньше сверхпроводящей щели.

Был изучен новый тип фотонного кристалла – на основе сверхпроводника второго рода, в котором образуется решетка вихрей Абрикосова, дающая периодическую модуляцию диэлектрической проницаемости. Изучена резонансная передача излучения через поляритоны в этой системе, а также для пленок с отверстиями различного типа.

Теоретически исследованы и детально проанализированы с помощью компьютерного моделирования свойства спектров пропускания, угловые зависимости и зонный спектр фотонного кристалла, представляющего собой двуслойную систему пленок сегнетоэлектрика (BST) подложки из MgO , на которую нанесены медные электроды. Указанный фотонный кристалл может служить оптическим переключателем. Получено хорошее согласие теории с экспериментальными данными.

Литература

- [1] Ю.Е. Лозовик, С.Л. Эйдерман, Расчет зонного спектра трехмерных металлических фотонных кристаллов с помощью зависящих от времени уравнений Максвелла, Математическое моделирование, том 18, №12, стр. 35-42 (2006).
- [2] Yu. E. Lozovik, S. L. Eiderman, M.V. Bogdanova, and M. Willander, The Absorption Spectra Versus Field Distribution for Metal-Dielectric Three-Dimensional Photonic Crystals, Laser Physics, Vol. 18, No. 4, pp. 417–423 (2008).
- [3] Богданова М.В, Лозовик Ю.Е, Эйдерман и др., Формирование спектра поглощения металло-диэлектрических трехмерных фотонных кристаллов, Математическое моделирование (в печати).
- [4] А. В. Беликов, М. В. Богданова, Ю. Е. Лозовик, Расчет зонной структуры металлических фотонных кристаллов: модифицированный метод разложения по плоским волнам, Математическое моделирование, т.19, No.4.с.19-26 (2007).
- [5] E.Mishina, A.Kolesnikov, Yu.Loosovik, A.Sigov, Th.Rasing, et.al., SWITCHABLE NONLINEAR METALLO-FERROELECTRIC PHOTONIC CRYSTALS, Appl.Phys.Lett. 91, 041107 (2007).
- [6] O.L. Berman, Yu.E. Loosovik, S.L. Eiderman, R.D. Coalson, Superconducting photonic crystals: Numerical calculations of the band structure, Phys.Rev.B **74**, 1, (2006).

[7] Yu. E. Lozovik, S. L. Eiderman, and M. Willander, Two-Dimensional Superconducting Photonic Crystal, Laser Physics, Vol. 17, No. 8, pp. 1183-1186 (2007).

[8] Ю.Е. Лозовик, С.Л. Эйдерман, Свойства сверхпроводящих фотонных кристаллов, ФТТ (в печати).

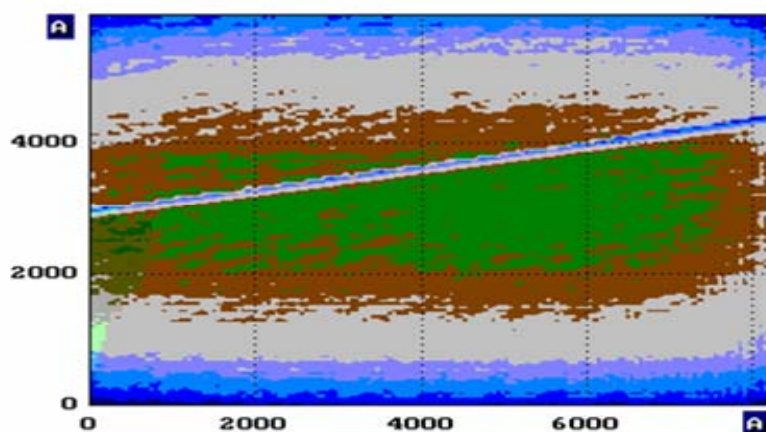
[9] O.L. Berman, Yu.E. Lozovik, R.Coalson et.al., Phys.Rev.B (submitted).

[10] O.L. Berman, V.S. Boyko, R.Ya. Kezerashvili, Yu.E. Lozovik, Anomalous far-infrared monochromatic transmission through a film of type-II superconductor in magnetic field, Phys.Rev., B 78, 094506 (2008).

[11] A.N. Poddubny, E. L.Ivchenko, Yu.E.Loizovik, Low-frequency spectroscopy of superconducting photonic crystals, Solid State Communications, 146, No.3, 143-147 (2008).

Нанооптика и нанолитография

В лаборатории изучен новый метод оптических измерений со сверхвысоким временным и одновременно с высоким пространственным разрешением, использующий локальное (ближнее) поле лазерных импульсов, усиленных вблизи иглы сканирующего зондового микроскопа или микроскопа атомных сил, в частности, благодаря возбуждению локальных плазменных резонансов в двухсвязной системе игла-подложка. Проведены детальные расчеты локальных резонансов и пространственных распределений оптических полей вблизи иглы. Сильное ближнее поле в субволновой (нанометровой) области под иглой может быть использовано для изучения линейных и нелинейных оптических свойств наноструктур, а также для сверхплотной записи информации - нанолитографии. Последнее было осуществлено нами экспериментально и было обнаружено возникновение *наноструктур* на поверхности при нанолокальном воздействии фемтосекундного лазерного импульса. Метод обнаруживает возможность ультраплотной записи ($\lambda/40$ где λ - длина волны). Отработан экспериментально и теоретически оптимальный режим для использования безапертурных ближних полей в нанолитографии.



Полоска толщиной 20 нм и глубиной 5 нм, созданная с помощью безапертурного метода ближнего поля. Возможность ультраплотной записи - $\lambda/40$ где λ - длина волны.

Безапертурные ближние поля могут также использоваться для оптических измерений со сверхвысоким временным, спектральным и одновременно с высоким пространственным разрешением.



С помощью сканирующей зондовой лаборатории (Ntegra, НТ МДТ) изучаются создаваемые нами наноструктуры и проводятся эксперименты по нанолитографии.

В лаборатории предложена и изучена экспериментально плазменная оптика поверхности с фемтосекундным временным разрешением. Продемонстрирована возможность усиления сигнала от поверхностного плазмона. С помощью предложенного метода прямым образом измерено затухание поверхностного плазмона. Экспериментально исследована генерация второй гармоники при взаимодействии фемтосекундных импульсов с металлической поверхностью с периодическим рельефом в условиях «плазмонного резонанса». Исследовано неколлинеарное взаимодействие двух поверхностных плазмонов в однолучевом и двухлучевом случае. Изучена визуализация поверхностных плазмонов с помощью сканирующего оптического акустического микроскопа.

Изучены:

- резонансная передача электромагнитных волн через пленку с периодически структурированной поверхностью;
- использование системы для применения в качестве сенсора;
- кавитационные процессы и самоорганизация при лазерном воздействии на вещество;
- экспериментально двухфотонная интерференция на сверхтонких пленках золота, нанесенных на кварцевые подложки. Проанализирована роль поглощения во всех модах, участвующих в процессе спонтанного параметрического рассеяния света. Определены условия, при которых поглощение для сигнальной волны и накачки оказывает незначительное влияние на интерференционную картину. Показано, что при реализации этих условий видность интерференционной картины и вид частотно-углового спектра на сигнальной волне определяются оптическими параметрами среды на частоте холостой волны, принадлежащей ближнему ИК-диапазону. Решенная задача важна в контексте физики квантовой информации.

Проанализированы спектры плазмонов, локализованных вблизи примесей, вблизи различных неоднородностей, рассчитано комбинационное рассеяние света на локализованных плазмонах, а также их затухание. Проанализирована сверхпрозрачность металлической пленки с нанотверстиями за счет возбуждения локальных плазмонов. Предсказано аномальное подавление рассеяния

электромагнитных волн от системы частиц с магнитным покрытием (неотражающие покрытия). Построена теория сканирующей емкостной микроскопии.

Изучено рассеяние света назад в неупорядоченной квазидвумерной системе.

Недавно нами в сотрудничестве с Институтом химической физики РАН был изучен эффект локального усиления люминесценции в системе нанокластеров золота и серебра, высаженных на мезопористые пленки TiO_2 при двухфотонном возбуждении. Усиление люминесценции оказалось зависимым от поляризации падающего излучения. Как было выяснено, основной вклад в люминесценцию вносят наночастицы металла. Теоретически было показано, что система двух близкорасположенных наночастиц даёт наибольшее усиление локального электромагнитного поля. Резонансные характеристики подобной системы зависят от поляризации возбуждающего импульса. Исследованная система является перспективной для управления переносом заряда на границе раздела металл-полупроводник.

Оптика сверхбыстрых процессов в твердых телах

Понимание фундаментальных процессов, происходящих в квантово-размерных структурах в фемтосекундном масштабе времени, важно для создания нового класса сверхбыстродействующих приборов и устройств и принципиально новой элементной базы нано- и оптоэлектроники, для разработки когерентного управления возбуждениями – экситонами, когерентного управления химическими реакциями и т.п. Кроме того, спектроскопия со сверхразрешением по времени дает уникальную информацию о сверхбыстрых процессах релаксации в твердых телах “в реальном времени”, позволяет, как показали наши исследования, селективно выделить релаксацию разных групп носителей заряда. В лаборатории был разработан новый метод исследования ферми-жидкостных свойств электронной подсистемы сверхпроводников и металлов по виду спектральной зависимости времени сверхбыстрой релаксации сверхбыстрого фотоиндуцированного отклика, получаемой с помощью фемтосекундной спектроскопии - методом накачка -- широкополосное зондирование. Предсказан вид спектральной зависимости времени сверхбыстрой релаксации фотоиндуцированного отклика в ряде проводящих материалов. Метод использует измерение спектральной зависимости скорости релаксации электронов вблизи поверхности Ферми с помощью техник накачка-широкополосное зондирование. Время релаксации резко возрастает для оптических переходов в окрестности ферми-поверхности, что дает возможность прямым методом определить положение уровня Ферми. В недодопированном материале YBCO обнаружена линейная зависимость скорости релаксации электронов, свидетельствующая о нефермиевском поведении носителей.

Был рассчитан электромагнитный отклик сверхпроводников (СП) при произвольном соотношении между длиной когерентности и лондоновской глубиной проникновения поля. Развита теория для переходов валентная зона-зона проводимости в сверхпроводниках, проанализировано проявление СП щели в этом переходе. Теория подтверждена с помощью фемтосекундной лазерной спектроскопии. Предложен и реализован экспериментально новый метод исследования констант электрон-фононного взаимодействия с помощью фемтосекундной спектроскопии.

В широкой спектральной области были исследованы фотоиндуцированные процессы, происходящие в C_{60} на фемтосекундном масштабе времен. Детально

изучены процессы и механизмы сверхбыстрой энергетической релаксации носителей заряда, что важно для возможных применений C_{60} в оптоэлектронике. Разработан новый метод исследования порогов подвижности, отделяющих локализованные состояния от делокализованных в неупорядоченных полупроводниках по спектральному переходу от экспоненциальной релаксации к “растянутой” экспоненте.

Исследованы эффекты кулоновской корреляции электронов и возбуждения плазмонов в металлических нанотрубках и влияние квазиодномерного характера электронной плотности в нанотрубках на проявление сильной корреляции электронов, в частности, на неквадратичную зависимость времени релаксации электронов вблизи уровня Ферми. Неквадратичный (отклоняющийся от предсказываемого теорией ферми-жидкости Ландау) характер затухания электронных возбуждений согласуется с экспериментальными данными для УНТ, полученными с помощью метода «накачка - широкополосный импульс». В этой связи проведены детальный расчет и анализ экситонных возбуждений в углеродных нанотрубках, их зависимости от свойств нанотрубок.

Совместно с лабораторией спектроскопии сверхбыстрых процессов и отделом спектроскопии твердого тела изучены сверхбыстрые процессы в оптической полости слой полупроводника-металл.

Работы по данной тематике велись в сотрудничестве с лабораторией спектроскопии сверхбыстрых процессов ИСАН, а также с Гумбольдтовским Университетом Берлина, Университетом Гетеборга, Университетом Беркли, МГУ, Институтом химической физики РАН.

Квантовые точки

Предсказана новая геометрическая (топологическая) фаза Берри в круговых квантовых точках с нечетным числом электронов. Поскольку эта фаза оказывается равной π , то собственные значения орбитальных моментов в системе получаются полуцелыми. Ненулевое значение фазы Берри возникает при аксиальной симметрии и двумерности системы, а его величина π вытекает из принципа Паули. Определены все свойства трехэлектронных квантовых точек с помощью непертурбативного по межэлектронному взаимодействию метода - разложения по безразмерному квантовому параметру Q , характеризующему отклонение от сильно-коррелированного (“кристаллизованного”) состояния электронов, но справедливого с хорошей точностью даже при Q порядка единицы. Этот подход применен для анализа перестроек и пересечения уровней в квантовой точке в сильных магнитных полях. Наше предсказание относительно новой фазы Берри и полуцелых орбитальных моментов хорошо согласуется с экспериментальными результатами, связанными с поведением квантовых точек в сильных магнитных полях.

Рассмотрена система из двух соседних квантовых точек (КТ) с двумерным (2D) параболическим латеральным удерживающим потенциалом и из двух связанных КТ - “молекула” из КТ. Изучены горизонтально и вертикально связанные КТ и их поведение во внешнем поперечном магнитном поле. Определены энергии основного состояния системы и энергетические спектры с учетом межэлектронного взаимодействия для широкого диапазона значений крутизны удерживающего потенциала, расстояний между центрами КТ и внешнего магнитного поля.

Предсказана спиновая перестройка основного состояния "молекулы" из КТ из синглетного состояния в триплетное (т.е. спонтанное намагничивание в "молекуле") [12]. Этот результат может оказаться полезным для спинтроники.

Ранее нами был предложен непertурбативный по взаимодействию полуаналитический метод расчета сильно коррелированной электронной системы в квантовых точках, основанный на разложении по безразмерному квантовому параметру, зависящему от крутизны удерживающего потенциала. "Невозмущенным" состоянием в этом методе является кристаллизованное состояние электронов – "вигнеровская молекула". Этот метод, как оказалось, дает прекрасные результаты даже для параметра разложения порядка единицы (даже в последнем случае ошибка составляет всего лишь 1-2 %!). Мы обобщили этот метод на экситоны в квантовых точках.

Литература

1. V.D. Mur, N.B. Narozhny, A.N. Petrosyan, and Yu.E. Lozovik, Quantum Dot Version of Berry's Phase: Half-Integer Orbital Angular Momenta, Phys.Rev.Lett. (submitted).arHiv:0707.
2. Ю.Е. Лозовик, В.Д. Мур, Н.Б. Нарожный 1/Q-разложение для энергетического спектра квантовых точек, ЖЭТФ, 123, вып.4. 1059-1066(2003).
3. Y.E. Lozovik, V.D. Mur, N.B.Narozhny , A.N. Petrosyan A spatially indirect exciton in vertically coupled quantum dots: 1/Q expansion. Laser Physics Letters, vol. 1(3), 154-160 (2004).
4. Kaputkina N.E., Lozovik Y.E. Dimensional effects and magnetic field influence on excitons in coupled quantum dots and coupled quantum wells. PHYSICA E-LOW-DIMENSIONAL SYSTEMS & NANOSTRUCTURES 26, No.1-4, 291-296 (2005).
5. N.E. Kaputkina, Y.E. Lozovik Magnetic field influence on spectrum rearrangement and spin transformation of coupled quantum dots. J. Phys.: Condens. Matter 18 (2006) S2169-S2174.
6. N.E. Kaputkina, Y.E. Lozovik Magnetic field influence on excitons in coupled quantum wells and coupled quantum dots and on exciton polaritons in microcavities. Phys.Stat.Sol.(c), v 3, No 10, pp.3500-3503, 2006.

Нанотрубки, наноэлектромеханические системы (НЭМС)

Прогресс в нанотехнологии сделал принципиально возможным создание наномеханизмов и наноэлектромеханических устройств, в частности, использующих нанотрубки. В многослойных нанотрубках, как показывают расчеты, энергетические барьеры для относительного движения слоев малы и поэтому их можно использовать как движущиеся части наномеханизмов, что недавно уже реализовано экспериментально. В этой связи предложена классификация структур многослойных нанотрубок, детально рассчитаны их потенциальные рельефы, проанализированы барьеры для относительного движения. Рассмотрены двухслойные нанотрубки, потенциальный рельеф которых отвечает резьбе винт-гайка. В микроскопическом подходе проанализированы различные типы движения. Предложены новые типы наноустройств с движением типа винт-гайка.

Мы предложили ряд новых наноэлектромеханических устройств на основе нанотрубок - элементы нанопамати, нанореле, наноактуаторы, нанотермометр, нановаристоры, переменные наноконденсаторы, НЭМС для наномедицины и

детально изучили их свойства. Были изучены способы управления движением и режимы работы наноэлектромеханических систем (НЭМС). Методом функционала плотности проведены расчеты свойств различных двухслойных углеродных нанотрубок. Изучено туннелирование между стенками двухслойных нанотрубок. Проанализировано влияние термодинамических флуктуаций на работу нанотрубок. Изучено влияние эффектов диссипации на работу НЭМС.

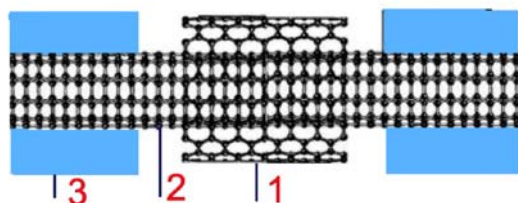


Рис.1. Пример предложенной НЭМС: нанотермометр на основе двухслойной нанотрубки. Рост амплитуды колебаний “челнока” 1 с температурой приводит к росту сопротивления в зафиксированной стенке 2 нанотрубки, присоединенной к электроду 3.

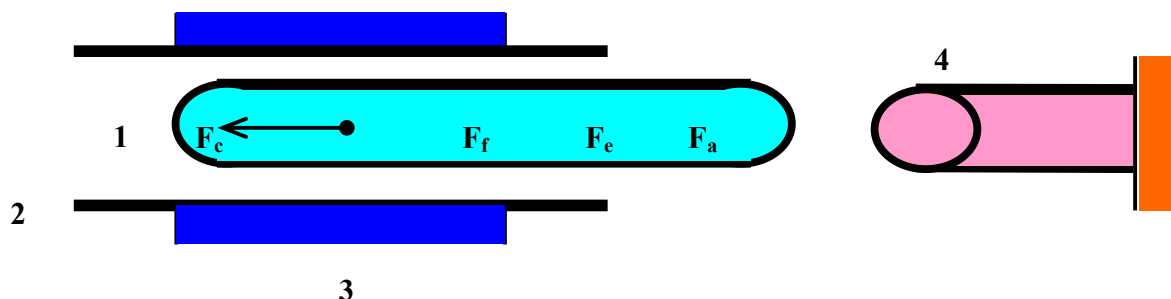


Рис. 2. Схема нанореле, используемого как ячейка памяти, на основе телескопической двухслойной нанотрубки. 1,2 – соответственно, внутренняя и внешняя стенки нанотрубки, 3 – электрод, 3, 4 - электроды, к которым подается управляющее напряжение.

Были детально проанализированы механизмы образования новых углеродных наноструктур — фуллеренов, наночастиц, нанотрубок и конусов. Предсказан эффект взаимного ориентационного плавления оболочек в многооболочечной наночастице (“луковице”). Рассчитаны потенциальные барьеры для вращения друг относительно друга оболочек углеродной наночастицы. Сделаны оценки температуры, при которой происходит ориентационное плавление наночастицы. В связи с возможным использованием фуллеритов в оптоэлектронике были детально изучены сверхбыстрые процессы в них.

Литература

1. E. Bichoutskaia, A.M. Popov, Yu.E. Lozovik, Nanotube-based data storage devices, *Materials Today*, 11, No.6,38-43 (2008).
2. Ю.Е.Лозовик, А.М.Попов, Свойства и нанотехнологические применения нанотрубок, *УФН*, 177, 786 (2007).
3. Ю.Е.Лозовик, А.М.Попов, Образование и рост углеродных наноструктур - фуллеренов, наночастиц, нанотрубок и конусов, *УФН*, 167, N7, 751-774(1997).
4. E. Bichoutskaia, A.M. Popov, Yu.E. Lozovik, G.S. Ivanchenko, N.G. Lebedev, Electromechanical nanothermometer, *Phys. Lett.A366*, No.4-5, 480-486 (2007).

5. A.M. Popov, Yu.E. Lozovik, S. Fiorito, L'Hocine Yahia, Biocompatibility and Applications of Carbon Nanotubes in Medical Nanorobots, *Int. J. of Nanomedicine*, 2(3) (2007).
6. O.L. Berman, Yu.E. Lozovik, M.V. Bogdanova, R.D. Coalson, Anomalous optical transmission through a vortex lattice in a film of type-II superconductor, *Phys.Rev.B* (in print). See also arXiv:0709.2198.
7. E. Bichoutskaia, M.I. Heggie, A.M. Popov, and Yu.E. Lozovik, Interwall interaction and elastic properties of double-wall carbon nanotubes, *Phys. Rev. B* 73(4) 045435 (2006).
8. Yu.E. Lozovik, A.G. Nikolaev, A.M. Popov, Bolt-and-nut pairs made from carbon nanotubes with artificial defects, *Fullerene, Nanotubes, and Carbon Nanostructures*, 14, Nos. 2-3, 227-231 (2006).
9. E. Bichoutskaia, M.I. Heggie, Yu.E. Lozovik, A.M. Popov, Diffusion of walls in double-walled nanotubes, *Fullerene, Nanotubes, and Carbon Nanostructures* 14, Nos.2-3, 215-220 (2006).
10. Yu.E.Loosovik, A.G.Nikolaev, A.M.Popov, Nanotube-based nanoelectromechanical systems, *JETP* 103, No.3, 447-459(2006).
11. E.Bichutskaya, A.M.Popov, Yu.E.Loosovik, A.El-Barbary, M.I.Heggie, Ab initio study of relative motion of walls in carbon nanotube, *Phys.Rev. B* 71, 113403 (2005).
12. V. Belikov, Yu. E. Loosovik, A. G. Nikolaev, A.M.Popov, Double-wall nanotubes: classification and barriers to walls relative rotation, sliding and screwlike motion, *Chem.Phys.Lett.*, vol.385, No.1-2, 72-78 (2004).
13. Yu.E. Loosovik, A.V. Minogin, A.M. Popov, Possible nanomachines: Nanotube walls as movable elements, *JETP Lett.*, 77, No.11, 631-635 (2003).

Спинтроника

Возможность контролировать наличие магнитного порядка с помощью прикладываемого напряжения исключительна важна в свете нынешнего стремительного развития спинтроники и магнетoeлектронных наносистем. Такая возможность была продемонстрирована только при очень низких температурах в полупроводниках с магнитными примесями (*dilute magnetic semiconductors – DMS*) . Физическая же реализация подобного явления при комнатных температурах невозможна в DMS в связи с низкой температурой Кюри с таких материалах. Важным достижением лаборатории является теоретическое обоснование возможности управления поверхностным ферромагнитным переходом в металлических ферромагнетиках, в которых температура Кюри гораздо выше. Предложен метод настройки температуры Кюри ферромагнитных металлических сплавов в диапазон температур, требуемый для применения предсказанного эффекта, с помощью правильного выбора концентрации компонент сплава (I.V.Ovchinnikov et.al., *PRB* 78 in print (2008)).

Молекулярная электроника

Мы изучили нелинейный электронный отклик двух молекулярных устройств – смесителей - на бихроматическое электрическое поле.

Рассмотренные системы: 1) молекула бензола, 2) лист графена; в обоих случаях системы связаны с тремя полиацетиленовыми цепочками. При большой амплитуде подаваемого сигнала в системе генерируются комбинационные частоты.

Квантовая электродинамика в оптической микрополости

Динамический эффект Казимира (ДЭК) – эффект рождения фотонов из вакуума в нестационарной оптической полости является одним из самых интересных, но до сих пор не обнаруженных экспериментально явлений квантовой электродинамики в полости. Ранее в наших работах (см., напр., Ю.Е.Лозовик, В.Г.Цветус, Е.А.Виноградов, Письма в ЖЭТФ, 61, 711-716(1995)) была предложена возможная экспериментальная реализация ДЭК – параметрическое сверхбыстрое изменение граничных условий с помощью рождения электронно-дырочной плазмы в первоначально прозрачной полупроводниковой пленке внутри полости с помощью фемтосекундного лазерного импульса. Сейчас предлагается использовать для сверхбыстрого изменения граничных условий полости также и пикосекундную инжекцию носителей заряда в указанную пленку.

В связи с планируемыми экспериментами актуальной становится задача аккуратного расчета числа фотонов, рождающихся за счет ДЭК в нестационарной полости с границами, движущимися с ультрарелятивистской скоростью.

Мы рассмотрели динамический эффект Казимира в быстро сжимающейся полости в рамках одномерной скалярной модели. Для случая, когда скорость сжатия постоянна, получено *точное* решение задачи.

Показано, что энергетическое распределение рожденных в равномерно сжимавшейся полости частиц *периодически* зависит от логарифма параметра ρ , равного отношению начального и конечного размеров полости и связанного со временем ее сжатия. Впервые показано, что эта зависимость из-за явлений интерференции внутри нестационарной полости немонотонна – имеется бесконечное число значений ρ_k , при которых рождение частиц отсутствует. С другой стороны, найдены значения параметров, при которых рождается оптимальное число частиц.

Рассмотрено управление лэмбовским сдвигом атома в оптической микрополости. Предсказан новый эффект – бесфотонное возбуждение атома в нестационарной микрополости, обусловленное неадиабатической модуляцией лэмбовского сдвига нестационарными нулевыми колебаниями (динамический эффект Лэмба).

Рассчитаны статистические свойства излучения, его угловое распределение и интенсивность.

Проанализирована природа наблюдающегося экспериментально сверхбыстрого переключения мод полости в системе «пленка полупроводника– металл».

Литература

1. A.M.Fedotov, Y.E. Lozovik, N.B.Narozhny, A.N.Petrosyan On the dynamical Casimir effect in a one-dimensional contracting cavity. Laser Physics, 17, No. 4, 310-315 (2007).
2. A.M.Fedotov, Y.E. Lozovik, N.B.Narozhny, A.N.Petrosyan Dynamical Casimir effect in one-dimensional uniformly contracting cavity. Phys.Rev. A74, 013806 (2006).
3. Y.E. Lozovik, N.B. Narozhny, A.M. Fedotov, Dynamical Casimir and Lamb effects and entangled photon states. Laser Phys, 13, No.2, 298-304 (2003).
4. Fedotov A., Y.E. Lozovik, Narozhny N. Instantaneous approximation for the dynamical Casimir effect. J. of Optics B, QUANTUM AND SEMICLASSICAL OPTICS ,7 , No.3, S64-S68 (2005).
5. N.B.Narozhny, A.M.Fedotov and Yu.E.Loosovik, Dynamical Lamb effect versus dynamical Casimir effect, Phys. Rev. A.64, 053807 (2001).

Экситоны и магнитоэкситоны в квантовых ямах. Бозе-конденсация дипольных атомов.

Изучены коллективные свойства дипольных экситонов и магнитоэкситонов и их фазы в квантовых ямах.

Изучена новая фаза - кристаллическая - в системе дипольных экситонов (в связанных квантовых ямах или изолированной квантовой яме в сильном поперечном электрическом поле, индуцирующем диполи).

Экспериментально кристаллизация экситонов может реализовываться для очень долгоживущих экситонов в достаточно широких квантовых ямах в электрическом поле при весьма низких температурах.

Она может быть обнаружена путем наблюдения особенностей в экситонной люминесценции или их транспорта, а также с помощью дифракции ультразвука на экситонном кристалле.

При помощи метода квантового Монте-Карло изучена нуль-температурная квантовая фазовая диаграмма двумерной системы бозонов с диполь-дипольным взаимодействием. Предсказано, что в системе имеется фазовый переход из жидкого (или газового) состояния в кристалл. В газовой фазе найдена доля сконденсировавшихся частиц как функция плотности. Спектр возбуждения находится приближенно из формулы Фейнмана. Несмотря на то, что бозе-конденсированные системы ДДЭ находятся в газовой, а не в жидкой фазе, они в сильно-коррелированном режиме обладают ближним порядком, имеют резко выраженный горб на структурном факторе, бозе-конденсат в них сильно истощен взаимодействием, а спектр возбуждений сильно отличается от боголюбовского вида. Проанализировано формирование ротонного минимума с ростом корреляции в системе при увеличении безразмерного параметра взаимодействия. Эффекты сильных корреляций ДДЭ подобны соответствующим эффектам в гелии с тем отличием, что гелий находится в жидкой. Статический структурный фактор найден в двух фазах. Параметр плавления Линдемана, вычисленный из первопринципных расчетов, равен в точке квантового фазового перехода 0.230.

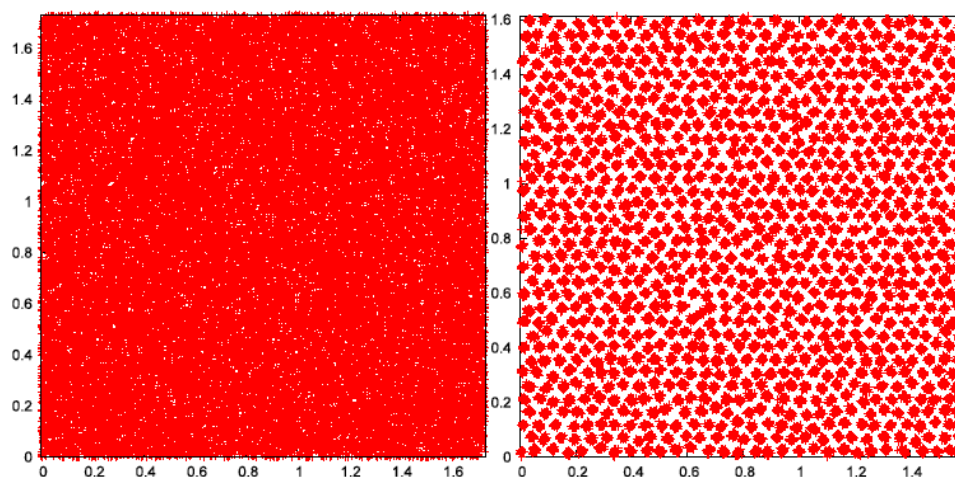


Рис. 3. Результат расчета квантовым методом Монте Карло квантовой кристаллизации в системе дипольных экситонов. Картины слева и справа получены для безразмерных плотностей 256 и 358, соответственно (единица длины пропорциональна дипольному моменту/заряд электрона e).

В кристалле ДДЭ экситоны образуют периодическую решетку, и в системе возникает диагональный дальний порядок. Сам кристалл является квантовым, т.е. волновые функции экситонов, расположенных в соседних узлах, существенно перекрываются. А переход газ - кристалл плотности (т.е. с ростом корреляций) возможен и при нулевой температуре, представляя собой квантовый фазовый переход. Как показали сотрудники нашей лаборатории, в кристалле ДДЭ в отличие от экситонного газа распределение плотности периодически осциллирует, парное распределение также проявляет дальние (long-range) осцилляции, а структурный фактор обладает крайне узким и высоким пиком. Рассчитаны фазовые диаграммы и температуры критических точек с участием кристаллической фазы ДДЭ.

Экспериментально кристаллизация ДДЭ может реализовываться для очень долгоживущих экситонов в достаточно широких КЯ в электрическом поле при весьма низких температурах. Она может быть обнаружена путем оптического наблюдения особенностей в люминесценции ДДЭ или их транспорта на большие расстояния, а также с помощью дифракции ультразвука на экситонном кристалле.

С помощью метода квантового Монте Карло интегрирования по траекториям детально изучены свойства системы экситонов в одиночной квантовой яме с диполями, наведенными сильным электрическим полем. Найден эффективный дипольный момент, распределение частиц и т.п.

С помощью моделирования диффузионным методом Монте-Карло детально исследована бозе-конденсация двумерных дипольных пространственно не прямых экситонов в квантовых ямах (КЯ). Численно рассчитаны энергия основного состояния, одночастичная матрица плотности и парное распределение. На основании данного численного расчета для однородной системы найдены структурный фактор, энергетический спектр, температурная зависимость локальной сверхтекучей плотности, плотность бозе-конденсата, химический потенциал, константа связи, скорость звука, а также температуры квазиконденсации и Костерлица-Таулеса. Для гармонической ловушки с большим числом экситонов вычислены профили полной и бозе-конденсатной плотностей. Показано, что в структурах связанных КЯ, в которых сейчас наблюдаются низкотемпературные особенности экситонной люминесценции, дипольные экситоны представляют собой сильно взаимодействующую систему.

Исследованы свойства двумерного дипольного бозе-газа в режиме малых плотностей. Уравнение состояния, найденное методом диффузионного Монте-Карло, количественно отличается от предсказания теории среднего поля (Гросса-Питаевского). Вычисляются статический структурный фактор, парное распределение, плотность сконденсировавшихся частиц как функция газового параметра. Отличия от теории среднего поля приводят к характерным отличиям в частоте коллективных колебаний системы в ловушке. В частности, указывается, что в двумерной системе, в отличие от 1D- и 3D- мерных систем, имеются количественные расхождения с теорией среднего поля даже в универсальном режиме, где свойства системы не зависят от конкретного типа потенциала взаимодействия).

Была рассчитана температура перехода в бозе-конденсированное сверхтекучее состояние, а также доли и профили бозе-конденсата и сверхтекучей компоненты для двумерных дипольных экситонных систем в ловушках. В гармонической ловушке экситонная система разделяется на сверхтекучий круг и нормальное кольцо вокруг него. В сверхтекучем круге имеется бозе-конденсат. С ростом температуры сверхтекучий круг сжимается. И когда он исчезает, система переходит в нормальную фазу.

Проанализировано влияние неупорядоченности на сверхтекучесть экситонов и магнитоэкситонов в двумерной ловушке.

Мы исследовали бозе-конденсацию и сверхтекучесть в мезоскопическом и макроскопическом квантовых кристаллах. Согласно нашим результатам, полученным с помощью квантового метода Монте-Карло, в идеальном макроскопическом кристалле фаза бозе-эйнштейновского *суперсолида* отсутствует — бозе-конденсата и сверхтекучей компоненты в макроскопическом пределе нет. Но в мезоскопическом кристалле появляется малая сверхтекучая доля и доля бозе-конденсата, которые убывают с ростом размера кристалла. Интересно, что в мезоскопическом суперсолиде возникает мезоскопический аналог недиагонального дальнего порядка — одночастичная матрица плотности медленно убывает на больших расстояниях, тогда как в соответствующем классическом кристалле она должна была бы убывать по экспоненциальному закону. В присутствии вакансий эффекты суперсолида резко усиливаются.

Так, даже при небольшой доле вакансий доля бозе-конденсата подскакивает почти до своего значения в соответствующей газовой фазе, а сверхтекучая доля — почти до единицы!

Более того, при доли вакансий всего в 16.7 % доли бозе-конденсата и сверхтекучей компоненты являются почти такими же, как в газовой фазе, вплоть до очень высоких плотностей — в 35 раз больше критической плотности перехода газ - кристалл.

Еще более интересно, что при таких высоких плотностях кристалл не является классическим — присутствие вакансий преобразует кристаллическую решетку, увеличивая вероятность перескока экситонов между узлами. Так что даже при таких высоких плотностях кристалл остается сильно квантовым. Для меньшей доли вакансий доли бозе-конденсата и сверхтекучей компоненты начинают снижаться уже при более низких плотностях, и с дальнейшим ростом плотности кристалл постепенно переходит в классический.

Коллективные свойства и фазы квазиодномерных бозе-систем

Изучены сверхтекучесть и сильно-коррелированные состояния бозонов в квазиодномерных системах (экситонов в наноструктурах, нанотрубках, либо бозе-атомов в квазиодномерных ловушках).

Изучены корреляционные функции в модели Калоджеро-Сазерленда. Нуль-температурная квантовая фазовая диаграмма включает в себя режимы квазиконденсации, квазикристаллизации и квазисуперсолида. С использованием метода реплик получены аналитические выражения для длинноволновых асимптотик одночастичной матрицы плотности. Показано, что разложение в нуле одночастичной матрицы плотности имеет как аналитические, так и не аналитические слагаемые. Корреляционные функции на всех расстояниях находятся численно, используя квантовый метод Монте-Карло. Вычислены импульсное распределение по импульсам и статический структурный фактор. Кинетическая и потенциальная энергия найдены из теоремы Гельмана-Фейнмана.

С помощью бозе-ферми дуальности в одномерной системе получена длинноволновая асимптотика коллективной моды в одномерной системе в сильно-коррелированном режиме Тонкса-Жиардо.

Экситонные поляритоны в оптической микрополости и проблема безинверсионного поляритонного лазера

Изучена конденсация и сверхтекучесть экситонных поляритонов в оптической микрополости, в которую погружена полупроводниковая квантовая яма .

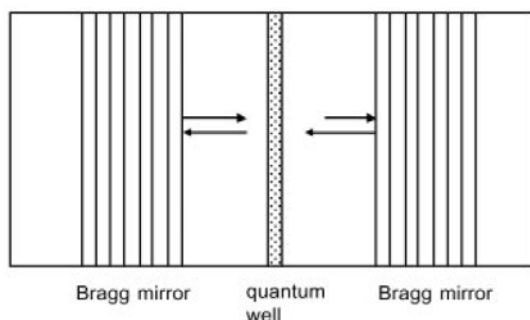
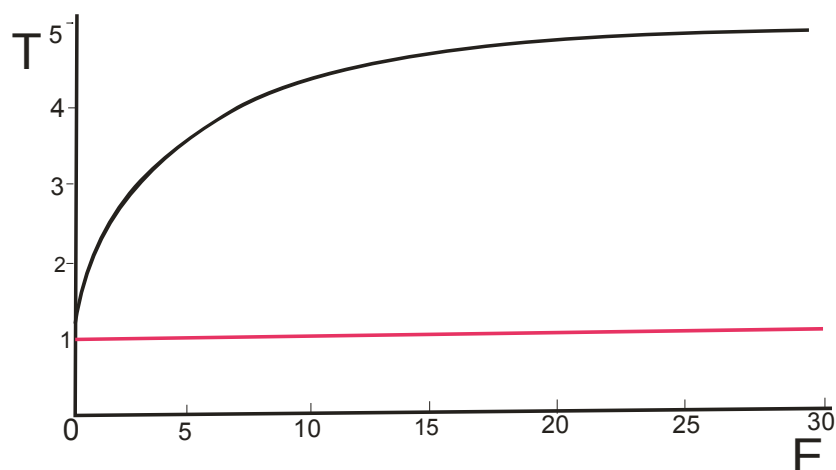


Схема микрополости: квантовая яма помещена между двумя зеркалами (многослойными брэгговскими рефлекторами).

Квазидвумерные экситоны в указанной квантовой яме могут резонансно возбуждаться фотонами оптической микрополости. В результате при большой добротности оптической микрополости в системе возникают композитные квазичастицы - экситонные поляритоны, представляющие собой суперпозицию фотонов микрополости и экситонов. При не слишком высоких плотностях экситонные поляритоны с большой точностью являются бозонами, и в этой квазидвумерной системе при понижении температуры должен происходить топологический переход Костерлица-Таулеса в сверхтекучее состояние с квазидальним диагональным порядком. Поскольку при малых продольных импульсах закон дисперсии поляритона определяется в основном законом дисперсии фотона в микрополости, то поляритон будет обладать малой эффективной массой, которая определяется геометрией оптической полости. Поэтому температура перехода, обратно пропорциональная эффективной массе, может достигать комнатных температур. Но после перехода системы поляритонов в фазу с квазидальним порядком фотоны, покидающие оптическую микрополость, должны обладать статистикой лазерного излучения. В этом смысле указанная система, рассматриваемая как источник излучения, является лазером, работающим без инверсии заселенностей. Данная система отличается от обычной бозе-системы (такой, как, скажем, гелий) тем, что поляритон имеет сложный закон дисперсии, который можно считать квадратичным лишь при малых импульсах, а взаимодействие поляритонов друг с другом зависит от импульсов самих поляритонов (данный факт является следствием наличия в системе процессов взаимного превращения экситона в фотон и наоборот). В силу неквадратичности закона дисперсии оператор тока частиц уже не пропорционален оператору плотности импульса, а, значит, идеи Ландау, использовавшиеся при описании жидкого гелия II, уже не применимы. Развитая теория позволила последовательно найти эффективное действие для фазы параметра порядка в рассматриваемой системе и вычислить сверхтекучую плотность поляритонов и температуру перехода Костерлица-Таулеса в системе поляритонов как функцию параметров полости и поляритонного расщепления.



Зависимость температуры фазового перехода системы поляритонов в оптической полости в состоянии с квазидальним порядком по фазе от поляритонного расщепления. Ниже этой температуры квазиравновесные фотоны, вылетающие из полости, будут обладать лазерной статистикой.

Показано, что с помощью магнитного поля можно управлять спектром прямых и непрямых экситонов в квантовых ямах, а также величиной поляритонного эффекта для заданной структуры и свойствами образующихся поляритонов. Условие сильного поляритонного эффекта - наличие резонанса энергии фотонной моды при $k=0$ и экситонной моды, существенно зависящей от внешнего магнитного поля.

Изучена бозе-конденсация экситонных поляритонов в двумерных ловушках и влияние на нее магнитного поля и случайных полей, связанных с неидеальностью границ .

Электронные кристаллы. Индуцированная магнитным полем кристаллизация электронов в двумерной системе.

В работах Лозовика и Юдсона впервые предсказана, а затем в нашей лаборатории подробно изучена инициированная магнитным полем квантовая кристаллизация двумерной (2D) системы электронов в полупроводниковых 2D структурах. Локализирующая роль сильного магнитного поля заключается в резком уменьшении амплитуды нулевых колебаний электронов в узлах решетки, что обеспечивает ее устойчивость. Этот первый пример влияния магнитного поля на фазы 2D электронного газа (за 5 лет до открытия квантового эффекта Холла) инициировал ряд теоретических и экспериментальных работ в области низкоразмерных электронных систем, в сильных магнитных полях, приведший, в частности, к открытию дробного квантового эффекта Холла.

При температуре, отличной от нуля, средне-квадратичная флуктуация частиц в узлах решетки $\langle u^2 \rangle$ расходится в термодинамическом пределе в 2D кристалле (согласно теореме Ландау и Пайерлса в 2D кристалле невозможен дальний порядок), так что при $T \neq 0$ критерий Линдемана не работает. Поэтому для феноменологического описания плавления 2D кристаллов и фазовой диаграммы 2D системы был предложен обобщенный критерий плавления (см.[6] и ссылки на наши более ранние работы), согласно которому плавление происходит,

когда относительная амплитуда колебаний соседних узлов решетки $\gamma_1 = \langle (u_1 - u_2)^2 \rangle / a^2$ превосходит некоторое критическое значение γ_{1c} , где $\langle (u_1 - u_2)^2 \rangle$ — средний квадрат относительного сдвига электронов в соседних узлах решетки (конечный при $T \neq 0$). Компьютерное моделирование продемонстрировало приближенную универсальность критического значения γ_{1c} для 2D кристаллов разной природы и полезность упомянутого критерия. Подробное исследование фазовой диаграммы системы с использованием этого критерия подтвердило эффект индуцированной магнитным полем кристаллизации 2D электронов.

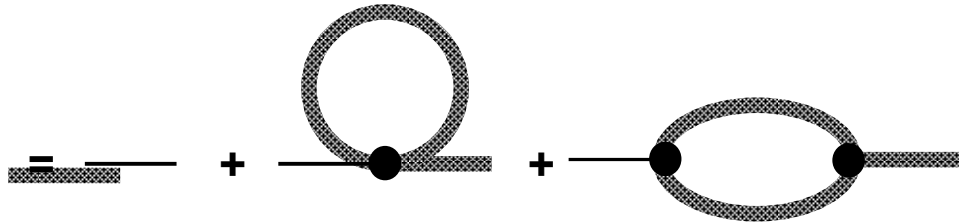
Нетривиальным для электронной системы в магнитном поле является то, что переход к нормальным координатам (необходимый для вычисления $\langle (u_1 - u_2)^2 \rangle$ в гармоническом приближении для кристалла) должен производиться с помощью диагонализации не потенциальной энергии, а *полного* гамильтониана, поскольку последний содержит члены с перепутанными координатами и импульсами, причем этот переход производится с помощью унитарного преобразования с зависящими от магнитного поля коэффициентами. Неучет этого обстоятельства и использование стандартных (полученных при $H=0$) формул для средне-квадратичных смещений с непоследовательной подстановкой в них законов дисперсии для колебаний при $H \neq 0$ может привести к качественно неверным выводам относительно влияния магнитного поля на кристаллизацию. К настоящему времени результат о расширении с ростом магнитного поля области существования кристаллической фазы (по концентрации и температуре) стал общепринятым, а приоритет наших работ в этой области — общепризнанным.

Нами была рассмотрено также влияние сил изображения на область существования кристалла. Оно становится существенным, если вблизи двумерного электронного газа находится металлический электрод, изменяющий на дальних расстояниях за счет сил изображения асимптотику закона взаимодействия между электронами с кулоновского на дипольный. Это приводит к дестабилизации электронного кристалла при малых концентрациях — к появлению второй точки квантового плавления. Нами было показано, что сильное магнитное поле в этих условиях также стабилизирует кристаллическую фазу в упомянутой области предельно малых концентраций, приводя к появлению второго купола на фазовой диаграмме температура-концентрация, внутри которого существует кристаллическая фаза.

Помимо феноменологического подхода, нами была построена последовательная микроскопическая теория для описания спектров колебаний и фазовой диаграммы системы, неустойчивости двумерных кристаллов, в частности, двумерных электронных кристаллов в магнитном поле.

Указанная теория позволила из первых принципов, зная лишь потенциалы взаимодействия между частицами, предсказывать температурную зависимость фононных спектров и точку плавления кристаллов, как квантовых, так и классических. Теория последовательно учитывает бесконечную подпоследовательность ангармонических вкладов одного и того же порядка малости по относительной амплитуде колебаний соседних узлов решетки γ_1 (γ_1 мало во всей области существования кристаллической фазы, в отличие от параметра Линдемана, расходящегося в термодинамическом пределе в двумерном кристалле). В развитом подходе (мы называли его самосогласованным 3+4-приближением) учитываются перенормированные, скелетные диаграммы первого порядка по γ_1 в собственно-энергетической части фононной функции Грина (см. уравнение для фононной функции Грина в диаграммном виде. Они связаны с *перенормированным*

вкладом квартичного ангармонизма “в первом порядке” (вторая диаграмма на Рис.) и с *перенормированным* вкладом кубического ангармонизма “во втором порядке” (третья диаграмма на Рис.). Конечно, этим диаграммам соответствуют бесконечные подпоследовательности ряда обычной теории возмущений по кубическому и квартичному ангармонизмам с вкладами порядка γ_1 .



Уравнение для фононной функции Грина кристалла, учитывающее диаграммы первого порядка по малому (вплоть до точки плавления) параметру γ_1

Прочие же диаграммы имеют более высокий по γ_1 порядок.

Предсказания теории для точек плавления и температурной зависимости спектров хорошо согласуются с результатами компьютерного моделирования и имеющимися экспериментальными данными для кристаллов с различными законами взаимодействия между частицами. В рамках развитой теории вычислены хорошо согласующиеся с результатами компьютерного моделирования и имеющимися экспериментальными данными температурная зависимость скорости поперечных длинноволновых фононов $c_t(n, T)$ и точка топологического фазового перехода типа Костерлица-Таулеса в классической области, определяющаяся через функцию $c_t(n, T)$. Неплохо согласуются и предсказанные значения для характерных параметров квантового, “холодного” плавления электронного кристалла при $T=0$ - критической плотности электронов n_c при $H=0$ и критического значения заполнения уровня Ландау u_c в сильных магнитных полях. Полученное критическое значение u_c хорошо согласуется с отсутствием дробного квантового эффекта Холла при малых заполнениях уровня Ландау u .

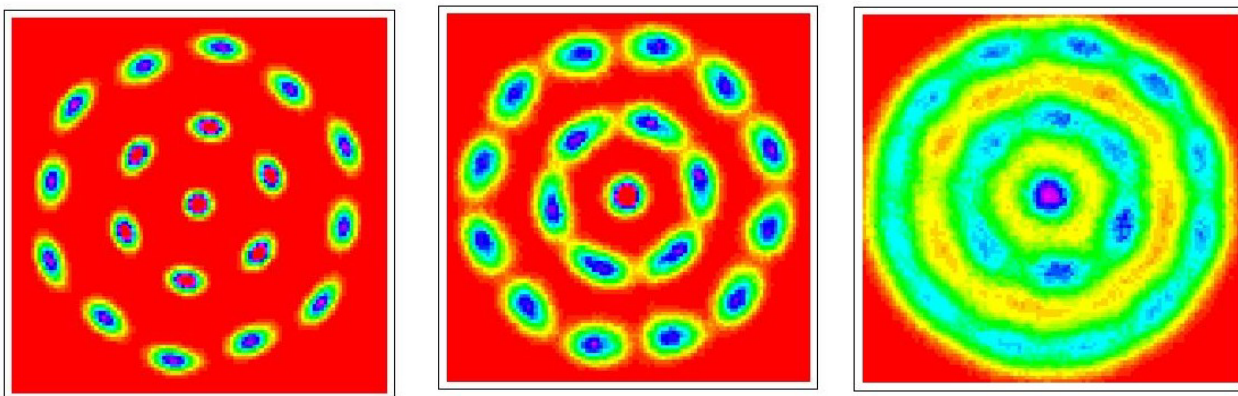
Развитая теория объяснила самосогласованным образом и существование универсальных параметров плавления, в частности, параметров плавления – (относительной) амплитуды колебания частиц в (соседних) узлах решетки и предсказала существование новых универсальных параметров. Более того, теория самосогласованным образом объяснила и малость параметра плавления ($\gamma_{1c}=0.1$) и связанное с ней большое отношение характерной энергии взаимодействия частиц к характерной кинетической энергии (например, в классической области это отношение есть $\Gamma_c \approx 140$). Как оказалось, эта малость (для параметра плавления γ_{1c} и критического заполнения уровня Ландау u_c) или, соответственно, большая величина (для Γ_c) связаны с одним и тем же фактом. А именно, вторая и третья диаграммы на Рис. имеют почти одинаковую величину, но разный знак! Поэтому происходит весьма сильная компенсация вкладов ангармонизма. Поскольку вклад в перенормировку частоты поперечного фонона кубического ангармонизма - третьей диаграммы на Рис. отрицателен и больше положительного вклада квартичного ангармонизма, поперечные частоты смягчаются с ростом управляющего параметра (температуры, плотности или заполнения уровня Ландау) вплоть до некоторого, почти универсального критического значения, отвечающего абсолютной неустойчивости

системы. Однако, например, топологическое плавление при $T \neq 0$ происходит немного раньше точки абсолютной неустойчивости кристалла.

Методами компьютерного моделирования (молекулярной динамики, Монте-Карло) изучен вид спектров и природа плавления в ряде двумерных кристаллов и впервые обнаружена предсказанная ранее теоретически (Гальпериным и Нельсоном) гексатическая (жидкокристаллическая) фаза в двумерной электронной системе, а также показано, что плавление в электронном кристалле действительно является двухстадийным.

Мезоскопические электронные кристаллы

В наших работах впервые исследованы мезоскопические электронные кристаллы и сильно-коррелированные состояния электронов в квантовых точках – их оболочечная структура, напоминающая гипотетический двумерный атом Томсона с соответствующей “Периодической таблицей”, и специфика их плавления. Интересно, что плавление носит многостадийный характер: сначала происходит взаимное ориентационное плавление соседних “кристаллических” оболочек, а затем, при существенно больших значениях управляющих параметрах (см. выше) – исчезновение оболочечной структуры и исчезновение “кристаллического” порядка внутри оболочек – переход в ферми-жидкость. Этот сценарий связан с малостью барьера относительного вращения оболочек по сравнению с барьером относительно перескока частиц между оболочками, в свою очередь обусловленным несоизмеримостью оболочек мезоскопических кластеров и соответствующей компенсацией взаимодействий соседних оболочек. Сильные магнитные поля для больших электронных кластеров так же, как и для протяженных систем, подавляют амплитуду нулевых колебаний и индуцируют кристаллизацию. Но для малых кластеров становится существенным и иной эффект – рост эффективной крутизны удерживающего потенциала в сильных магнитных полях, приводящей к росту равновесной плотности электронов. В результате влияние магнитного поля на кристаллизацию системы нескольких электронов в квантовых точках оказывается немонотонным.



Квантовое ориентационное и радиальное плавление мезоскопических электронных кластеров. Эволюция распределения $N=19$ электронов при изменении крутизны удерживающего потенциала (переход от вигнеровского кристалла к “вигнеровской молекуле”). V. Filinov, M. Bonitz, and Yu. E. Lozovik, Phys. Rev. Lett. 86, 3851 (2001).

Двумерная электронно-дырочная система в сильном магнитном поле: бозе-конденсат магнитоэкситонов как точное основное состояние системы

Двумерные (2D) электронные и электронно-дырочные ($e-h$) системы в сильном магнитном поле обладают рядом уникальных свойств. К особенностям этих систем можно прежде всего отнести полную дискретность спектра свободных частиц, который состоит из эквидистантных уровней Ландау (УЛ). Другим важным свойством является макроскопическое вырождение каждого уровня Ландау с кратностью вырождения, пропорциональной магнитному полю. В сильных магнитных полях характерная энергия взаимодействия частиц друг с другом e^2/r_H оказывается значительно меньшей, чем расстояния между УЛ. В такой ситуации сами уровни Ландау не только остаются хорошо определенными, но и, более того, виртуальными переходами частиц между ними, возникающими за счет межчастичных взаимодействий, можно пренебречь по параметру $(e^2/r_H)/\hbar\omega_c$.

Если в гамильтониане, описывающем межчастичные взаимодействия, отбросить члены, отвечающие виртуальным переходам частиц между различными уровнями Ландау, то в этом приближении (которое мы будем называть приближением сильного магнитного поля) остающийся гамильтониан сохраняет число частиц на каждом из УЛ.

Но даже после этого серьезного упрощения наличие макроскопического вырождения делает, на первый взгляд, безнадежным аналитическое решение задачи о нахождении точного состояния взаимодействующих частиц даже на одном УЛ, поскольку, казалось бы, эта задача должна свестись к системе макроскопически большого числа секулярных уравнений. Трудность, связанная с вырождением, действительно оказывается серьезной и делает невозможным исследование системы с помощью стандартных диаграммных методов, если в качестве нулевого приближения используется невзаимодействующая система. Так, в диаграммной технике при $T=0$ появляются расходимости, связанные с переходами между состояниями на данном уровне Ландау. В температурной же диаграммной технике трудности появляются при исследовании низкотемпературной области, поскольку параметром разложения оказывается величина $(e^2/r_H)/T$, расходящаяся при $T \rightarrow 0$ (так что исследование основного состояния оказывается вообще невозможным). В наших работах был предложен метод преодоления этих трудностей, который заключается в том, что в рамках температурной диаграммной техники часть взаимодействий учитывается уже в нулевом порядке теории возмущений - введением аномальных гриновских функций (отвечающих $e-h$ спариваниям). После этого в перестроенном ряду теории возмущений расходящиеся при $T \rightarrow 0$ члены отсутствуют, поскольку теперь параметром разложения оказывается величина $(e^2/r_H)/T \exp(-(e^2/r_H)/T)$.

С помощью такого подхода удалось выяснить термодинамические свойства системы, в том числе и низкотемпературные. Более того, удалось доказать, что любая диаграмма ряда теории возмущений для энергии, которая описывает корреляционные поправки к приближению Хартри-Фока (учитывающего аномальные экситонные спаривания), при $T \rightarrow 0$ обращается в нуль.

Энергия основного состояния $e-h$ системы, таким образом, совпадает с энергией, которую дает приближение самосогласованного поля и оказывается равной сумме энергий связи *изолированных* экситонов нулевого импульса.

Кроме того, было показано, что вклады в неприводимый четырехполюсник при $T \rightarrow 0$ сводится только к диаграммам лестничного типа, просуммировав которые, можно найти (по полюсам двухчастичной функции Грина) спектр двухчастичных возбуждений системы на данном уровне Ландау. Он оказался соответствующим выходу одного экситона из конденсата $e-h$ пар и приобретению им конечного импульса P .

Таким образом, была доказана эквивалентность (в пренебрежении переходами на более высокие УЛ) основного состояния двумерной электронно-дырочной системы (с зарядово-симметричными взаимодействиями) двумерному бозе--конденсату идеального газа экситонов с нулевым импульсом. При учете корреляционных поправок к энергии основного состояния (связанных с переходами на высшие уровни Ландау) газ экситонов становится слабо неидеальным с очень большой сжимаемостью, а спектр возбуждений - звуковым.

С учетом этих, весьма неожиданных, результатов большой интерес вызывает выяснение их смысла и с точки зрения квантовой механики взаимодействующей системы многих частиц. Построению квантовой механики 2D системы взаимодействующих e и h в сильном магнитном поле были посвящены наши работы, в которых было точно решено многочастичное уравнение Шредингера задачи, описывающее электронно-дырочную систему в приближении сильного магнитного поля, и найдены его решения для основного и двухчастичных возбужденных состояний.

Оказалось, что утверждение об эквивалентности основного состояния системы идеальному газу экситона нулевого импульса, находящихся в конденсате, имеет буквальный смысл: волновая функция основного состояния имеет вид $(Q_0^+)^N |0\rangle$, где Q_0^+ -оператор рождения 2D экситона в сильном магнитном поле с импульсом $P=0$, т.е. действительно происходит конденсация экситонов в одно квантовое состояние. Этот результат устанавливает явную связь основного состояния с конденсатом $e-h$ пар и позволяет существенно продвинуться в анализе свойств системы как для основного, так и для возбужденных состояний. Оказывается, кроме того, что с помощью операторов вторичного квантования 2D экситонов в сильном магнитном поле (2D магнитных экситонов) можно довольно эффективно описывать различные (симметричные) $e-h$ системы, причем, потенциал межчастичного взаимодействия в них может быть произволен (необходимо лишь выполнение условия $(e^2/r_H)/\hbar\omega_c \ll 1$). Это позволило нам найти ряд близких точно решаемых моделей. Было также показано, что основное состояние в виде $(Q_0^+)^N |0\rangle$ непосредственно следует из свойства зарядовой симметрии гамильтониана – из инвариантности гамильтониана относительно поворотов в соответствующем “изотопическом” пространстве и следующем из этой инвариантности интеграла движения. Полученное точное решение может реализоваться в помещенных в сильное магнитное поле электронно-дырочных системах в полупроводниковых или полуметаллических квантовых пленках, в слоистых системах, и в этих же системах в скрещенных магнитном и слабом электрическом полях (в последнем случае магнитоэкситоны конденсируются в состояние с импульсом $P_0 = M [e\hbar N]/N^2$, где M - зависящая от N масса магнитоэкситона).

В обсуждаемом подходе трудности, связанные с макроскопическим вырождением уровней Ландау, не возникают вообще, поскольку экситонные состояния учитывают парные корреляции между e и h , а вырождение ими оказывается снятым уже с самого начала.

Таким образом, в описанном цикле наших работ была впервые построена теория двумерной электронно-дырочной системы в сильных магнитных полях и было найдено точное решение задачи для основного и ряда возбужденных состояний системы. Показано, что оно соответствует бозе-конденсату невзаимодействующих магнитоэкситонов и является следствием динамической симметрии в задаче. Найден новый класс точно-решаемых задач для двумерных систем взаимодействующих частиц.

Результаты теории подтверждены экспериментально (напр., группой Д.Чемла, Беркли).

Приведенные результаты легко (фактически переобозначением соответствующих величин) обобщаются на систему магнитоэкситонов в однокомпонентной системе, возникающих при переходе электронов на более высокие уровни Ландау.

Магнитооптика двумерных экситонов и управление люминесценцией внешними полями

В наших работах были впервые изучены свойства квазидвумерных экситонов в изолированной и связанных квантовых ямах и их оптические свойства в сильных магнитных полях. Был рассчитан рост массы экситона в магнитном поле, который, как оказалось, хорошо согласуется с экспериментом. Изучены законы дисперсии 2D магнитоэкситона, предсказана их немонотонность для возбужденных состояний экситона (т.н. ротонные минимумы). Предсказано подтвержденное экспериментально управление люминесценцией пространственно – непрямыми двумерными экситонов в магнитном поле, параллельном плоскости квантовых ям. Рассчитанные законы дисперсии хорошо согласуются с экспериментом.

Фазовые переходы, когерентные оптические явления и сверхтекучесть в двухслойных электронно- дырочных системах в сильном магнитном поле

Нами были впервые предсказаны (см.литература) когерентные свойства и сверхтекучесть в системе не прямых экситонов и магнитоэкситонов в связанных квантовых ямах, изучена фазовая диаграмма этой системы, эффекты увлечения, ее оптические и магнитные свойства и эффекты Джозефсона в (в несверхпроводящей системе !).

Было изучено влияние неупорядоченности на бозе-конденсацию и сверхтекучие свойства экситонов. Впервые рассмотрена слабая локализация составных частиц - экситонов. Показано, что указанные когерентные свойства и сверхтекучесть могут иметь как двухслойные электронно-дырочные системы, так и двухслойные электронные системы в квантующих магнитных полях.

Предсказано образование экситонной жидкости и образование кристаллической фазы в системе. Изучена возможность управления бозе-конденсатом не прямых экситонов и магнитоэкситонов с помощью магнитного и электрического полей и возможная фононная спектроскопия бозе-конденсата.

Предсказаны новые нелинейно-оптические явления в бозе-конденсате экситонов, в частности, отражение света назад и аномальное преломление света в экситонном конденсате.

Рассмотрена нестабильность двухслойной системы композитных фермионов (при половинном факторе заполнения в каждом слое) относительно спаривания. Проанализирована влияние маргинальности композитных фермионов (отсутствие слабо затухающих возбуждений вблизи поверхности Ферми) на спаривание.

Рассмотрена система взаимодействующих пространственно-разделенных экситонов и электронов при наличии бозе-конденсата экситонов. Исследованы кинетические свойства данной системы, обусловленные эффектами увлечения — взаимодействием возбуждений в подсистеме экситонов с электронами. Получены выражения для коэффициентов линейного отклика подсистемы электронов на величины, характеризующие неравновесность в подсистеме экситонов. Экспериментальное наблюдение этих эффектов увлечения может дать новую информацию о фазовом состоянии экситонов по электрическому отклику в слое электронов и, кроме того, дать новый способ управления экситонами с помощью электронов. Предсказано необычное комбинационное рассеяние света и двухфотонное испускание бозе-конденсированными экситонами, обусловленное *одновременной* рекомбинацией (или рождением) двух экситонов с противоположными импульсами. Эти эффекты, оставляющие неизменными число надконденсатных экситонов, возможны *только* при наличии бозе-конденсата в системе, и поэтому могут служить новым методом его обнаружения. Исследована возможность охлаждения экситонов когерентным излучением в режиме захвата заселенности.

Исследована фононная спектроскопия когерентной фазы экситонов. Проанализировано управление когерентной фазой межямных экситонов с помощью поперечного электрического и параллельного магнитного полей.

Квантовый эффект Холла

В дрейфовом приближении нами был наглядно объяснен квантовый эффект Холла как следствие связи холловской проводимости с геометрическим топологическим инвариантом в системе.

Нами был впервые изучен динамический отклик в режиме квантового эффекта Холла и показано, что он отражает свойства фрактальных контуров случайного потенциала. Предсказано явление дрейфового резонанса в этой системе на замкнутых эквипотенциалах случайного потенциала на уровне Ферми. Изучено влияние кулоновского взаимодействия на дрейфовый резонанс. Рассмотрено разрушение идеального холловского квантования с ростом частоты внешнего поля из-за возбуждения локализованных состояний в двух различных предельных случаях — в системе с короткодействующими примесями и в плавных случайных потенциалах. Рассмотрена микроскопическая теория краевых магнитоплазмонов, основанная на обобщенном приближении хаотических фаз.

Выведено уравнение состояния для разреженной системы анионов — квазичастиц с дробной статистикой.

Установлена связь характеристик спектра краевых возбуждений в режиме квантового эффекта Холла и конформной инвариантности системы.

Была построена теория композитных фермионов в анизотропной системе при половинном заполнении уровня Ландау. Показано, что форма ферми-поверхности композитных фермионов — такая же, как и в двумерной системе электронов в отсутствии поля.

Изучена спиновая поляризация композитных фермионов.

Сверхтекучесть, сверхпроводимость и магнетизм мезоскопических частиц и массивов из мезоскопических частиц

Детально рассмотрена система мезоскопических ловушек бозе-конденсированных атомов. Предложена новая модель, описывающая квантовые флуктуации фаз параметра порядка в массивах мезоскопических сверхпроводящих и сверхтекучих структур и их влияние на разрушение упорядоченного состояния. В модели используется последовательное определение “оператора фазы” в квантовой механике. Построенная теория позволяет рассматривать массивы столь малых частиц, среднее число частиц в которых мало и стандартный подход, использующий операторы фазы и числа частиц как сопряженные, неприменим. Было установлено существенное отличие фазовых диаграмм массивов макроскопических и мезоскопических объектов. Аналогичные результаты получены также с помощью модели Бозе-Хаббарда. Изучено влияние слабой локализации квазичастиц в неупорядоченном сверхпроводнике на его теплопроводность. Изучен сверхпроводящий переход в слоистых системах. Предсказан аномальный диа- или парамагнетизм мезоскопических частиц. Изучены свойства сверхпроводящих частиц нанометровых размеров. Рассмотрено образование и распределение кластеров нанометровых размеров в плотной среде. Проанализирована запирающая роль кулоновского взаимодействия в нанометровых баллистических контактах в полупроводниках.

Спектроскопия твердого тела

Была построена теория спектров колебаний кристаллов, последовательно учитывающая все ангармонизмы решетки одного и того же порядка по малому (вплоть до точки плавления) безразмерному параметру — отношению среднеквадратичного смещения атомов из узлов решетки к ее периоду. Суммирование бесконечной последовательности диаграмм, имеющих одинаковый порядок по указанному параметру, дает замкнутое уравнение для частот колебаний. Численный расчет этого уравнения показывает, что поперечные фононы смягчаются с ростом управляющего параметра — температуры или плотности частиц и т.п. Смягчение спектра происходит сначала линейно, потом более резко и, наконец, при некотором значении управляющего параметра пропадает действительное решение для частот поперечных колебаний. Это сигнализирует о неустойчивости, связанной с исчезновением поперечного модуля сдвига. Таким образом, удастся рассчитать точки плавления из первых принципов, задавая лишь потенциалы взаимодействия между частицами. Расчеты хорошо согласуются с физическими и численными экспериментами. Помимо этого, удалось объяснить универсальность параметра Линдемана и других величин. На двумерные системы обобщен и обоснован эмпирический критерий плавления типа параметра Линдемана (к двумерии обычный критерий Линдемана неприменим, т.к. среднеквадратичное смещение частиц из узла расходится). Убедительным доказательством справедливости этой теории, помимо адекватного анализа скелетных диаграмм теории возмущений по ангармонизмам, является очень хорошее согласие выводов теории с результатами численного и физического экспериментов для ряда двумерных кристаллов.

Изучены новые методы создания фононного лазера.

Исследована слабая локализация экситонов и плазмонов, а также квазичастиц со случайной массой в разупорядоченной системе.

Изучены фазовые переходы в ряде трехмерных физических системах, описываемых ХУ-моделью. Описан фазовый переход спираль-клубок для вихрей. Обнаружена связь между фрактальной размерностью существенных топологических возбуждениях и критическими индексами фазовых переходов.

Атомы и молекулы

В широком диапазоне магнитных полей (МП) были изучены спектры, силы осцилляторов и иные характеристики мало- и многоэлектронных атомов и ионов, молекул.. Детально изучена резкая перестройка структуры движущегося в сильном магнитном поле атома с ростом его магнитного импульса. Скорость атома в магнитном поле – немонотонная функция импульса; вычислена максимальная скорость в данном поле. Детально проанализирована зависимость массы атома от магнитного поля. Рассмотрен парамагнетизм многоэлектронных атомов, диссоциация и перестройка типа связи молекул в сверхсильных магнитных полях.

С помощью разложения по обратной размерности пространства аналитически рассчитаны приближенные зависимости энергии связи трех атомов от параметров взаимодействия, условие образования кластера из нескольких частиц и его спектр, с высокой точностью (до десяти знаков !) определены константы Ван-дер-Ваальсова взаимодействия (в том числе с учетом неадиабатических поправок).

Рассчитан тороидальный момент атомов, связанный с несохранением четности, и проанализированы методы его измерения.

Рассмотрены эффекты увлечения в двух вертикально связанных ловушках с бозе-конденсированными атомами.

Пылевая плазма

С помощью компьютерного моделирования изучена оболочечная структура и размеры трехмерных кластеров из заряженных пылевых частиц в плазме, взаимодействующих друг с другом (с учетом экранировки) по закону Юкава и удерживаемых внешним потенциалом.

Развитие методов теории многих взаимодействующих частиц

Предложено обобщение метода функционала плотности на зависящие от времени процессы, которое вместо обычного описания системы через ток и плотность базируется на физических величинах, характеризующих одночастичную матрицу плотности, и потому описывает кинетику частиц. Подобные теории низшего порядка: 1) квантовая гидродинамика, 2) теории, учитывающие не только продольные плазменные коллективные возбуждения, но и поперечные фононные моды в ферми-системе. Развитые подходы полезны для осуществления крупномасштабного моделирования для многочастичных систем.

Разработана концепция и продемонстрированы применения эффективных потенциалов, в том числе, с учетом недиагональных вкладов. Рассмотрена динамика гауссовых волновых пакетов.

Компьютерное моделирование

Развиты новые методы компьютерного моделирования динамики квантовых систем – квантовая молекулярная динамика – основанные на вигнеровском подходе к квантовой механике и квантовой томографии. Последний подход является многообещающим, т.к. в нем даже в рамках квантовой механики, в отличие от иных подходов, вводится положительно определенная функция, а это позволяет в принципе преодолеть трудность с осцилляцией знаков при моделировании ферми-систем.

С помощью этих методов рассчитано туннелирование волновых пакетов, рассчитано время туннелирования, влияние взаимодействия на туннелирование, слабая локализация электронов в разупорядоченных системах.

С помощью диффузионного метода Монте-Карло рассчитано влияние разупорядоченности на бозе-конденсацию, сильно-коррелированный режим одномерной бозе-системы.

С помощью квантового метода Монте-Карло интегрирования по траектории рассчитаны сильно-коррелированные и когерентные состояния в ряде бозе- и ферми-системах.

С помощью компьютерного моделирования рассчитаны спектры, термодинамические и структурные свойства, а также плавление ряда двумерных протяженных систем – кулоновской, дипольной и ван-дер-ваальсовой. Методами компьютерного моделирования изучена природа плавления двумерных кристаллов и впервые обнаружена предсказанная ранее теоретически гексатическая (жидкокристаллическая) фаза в двумерной электронной системе, а также показано, что плавление в электронном кристалле действительно является двухстадийным. Методами компьютерного моделирования подробно изучена ангармоническая структура спектров. Результаты моделирования свидетельствуют о том, что с ростом температуры происходит смягчение поперечных и ужесточение продольных фононов. Впервые исследованы мезоскопические электронные кристаллы и сильно-коррелированные состояния электронов в квантовых точках.

Общие проблемы

Выполнен общий анализ фазовых переходов в двумерных системах с использованием конформной теории поля. Развита непертурбативный по взаимодействию метод расчета связанных состояний в квантовых системах с помощью ε -разложения вблизи пространственной размерности $d=2$, а также с помощью $1/d$ -разложения, где d - размерность пространства.

Проанализировано уравнение состояния для квазичастиц с дробной статистикой – анионов.

Изучен механизм конфайнмента кварков, основанный на стохастическом поведении глюонных полей и локализации Андерсона в соответствующем случайном статическом эффективном потенциале.

Литература

1. J. Böning, A. Filinov, P. Ludwig, H. Baumgartner, M. Bonitz, Yu.E. Lozovik, Melting of Trapped Few-Particle Systems, Phys. Rev. Lett. 100, 113401 (2008).
2. O.L. Berman, Yu.E. Lozovik, G. Gumbs, Bose-Einstein condensation and superfluidity of magnetoexcitons in bilayer graphene, Phys. Rev. B 77, 155433 (2008).

3. O.L. Berman, Yu.E. Lozovik, D.W. Snoke, Theory of Bose-Einstein condensation and superfluidity of two-dimensional polaritons in an in-plane harmonic potential, *Phys. Rev. B* 77, 155317 (2008).
4. A.N. Poddubny, E. L. Ivchenko, Yu.E. Lozovik, Low-frequency spectroscopy of superconducting photonic crystals, *Solid State Communications*, 146, No.3, 143-147 (2008).
5. G. E. Astrakharchik, Yu.E. Lozovik, Super-Tonks-Girardeau regime in trapped one-dimensional dipolar gases, *Phys. Rev. A* 77, 013404 (2008).
6. Yu. E. Lozovik, A. G. Semenov, THEORY OF SUPERFLUIDITY IN A POLARITON SYSTEM, *Theoretical and Mathematical Physics*, 154(2): 319–329 (2008).
7. Yu.E. Lozovik, A.A. Sokolik, Electron-hole pair condensation in graphene bilayer, *JETP Lett.*, vol. 87, No.1, 55-59 (2008) (translated from *Pis'ma ZhETF*, vol. 87, No.1, 61-65 (2008)).
8. M. Willander, Q.X. Zhao, Q.-H. Hu, P. Klason, V. Kuzmin, S.M. Al-Hilli, O. Nur and Yu.E. Lozovik, Fundamentals and properties of zinc oxide nanostructures: Optical and sensing applications, *Superlattices and Microstructures*, 43, No.4, 352-361(2008).
9. Voronova N.S, Lozovik Yu.E., Bose condensation of exciton polaritons in an optical microcavity, *Phys. of Solid State*, 50, No.8, 1555-1559(2008).
10. Aiboushev A.V., Astafiev A.A., Lozovik Yu.E., S.P. Merkulova et al., Enhanced luminescence of silver nanoclusters in mesoporous film, *Phys. Lett.*, A372, No.31, 5193-5197(2008).
11. Berman O.L., Kezerashvili R.Y., Lozovik Yu.E., Collective properties of magnetobexcitons in quantum wells and graphene superlattices, *Phys. Rev. B* 78, No.3, 035135(2008).
12. Bichoutskaia E, Popov A.M., Lozovik Yu.E., Nanotube-based data storage devices, *Materials Today*, 11, No.6, 38-43(2008).
13. Berman O.L., Lozovik Yu.E., Snoke D.W., Theory of Bose-Einstein condensation and superfluidity of two-dimensional polaritons in an in-plane harmonic potential, *Phys. Rev. B* 77, No.15, 155317(2008).
14. Bogdanova M.V., Eiderman S.L., Lozovik Yu.E., M. Willander, Absorption spectra versus field distribution for metal-dielectric three-dimensional photonic crystals, *Laser Physics*, 18, No.4, 417-423 (2008).
15. Kaputkina N.E., Lozovik Yu.E., Indirect excitons in coupled quantum dots and exciton polaritons in optical microcavities in magnetic field, *PHYSICA B-CONDENSED MATTER*, 403, No.5-9, 1537-1538 (2008).
16. Lozovik Yu.E., Kurbakov I.L., Astrakharchik G.E., M. Willander, Bose condensation of two-dimensional dipolar excitons: Simulation by the quantum Monte Carlo method, *J. Exp. Theor. Phys.*, 106, No.2, 296-315(2008).
17. Lozovik Yu.E., Semenov A.G., Theory of superfluidity in a polariton system, *Theor. Math. Phys.*, 154, No.2, 319-329 (2008).
18. Filinov, J. Böning, M. Bonitz, Yu.E. Lozovik, Controlling the spatial distribution of superfluidity in radially ordered Coulomb clusters, *Phys. Rev. B* 77, 214527 (2008).
19. Berman O.L., Lozovik Yu.E., Gumbs G., Magnetoplasmons in layered graphene structures, *Phys. Rev. B* 78, 085401 (2008).
20. O.L. Berman, V.S. Boyko, R.Ya. Kezerashvili, Yu.E. Lozovik, Anomalous far-infrared monochromatic transmission through a film of type-II superconductor in magnetic field, *Phys. Rev. B* 78, 094506 (2008).
21. G.E. Astrakharchik, J. Boronat, I.L. Kurbakov, Yu.E. Lozovik, Quantum phase transition in a two-dimensional system of dipoles, *Phys. Rev. Lett.*, 98, 060405 (2007).

22. Yu. E. Lozovik, I. L. Kurbakov, G. E. Astrakharchik, M. Willander, Bose Condensation of Two-Dimensional Dipolar Excitons: Simulation by the Quantum Monte Carlo Method, *J.Exp.Theor.Phys.*, 106, No.2, 296-315 (2008).
23. G. E. Astrakharchik, J. Boronat, J. Casulleras, I. L. Kurbakov, Yu. E. Lozovik, Weakly interacting two-dimensional system of dipoles: Limitations of the mean-field theory, *Phys. Rev. A* 75, 063630 (2007).;
24. Yu.E. Lozovik, A.G. Semenov, On phase transition type in the polariton system in optical microcavity, *JETP Lett.*, 86, No.1, 30 -34 (2007).
25. E.Mishina, A.Kolesnikov, Yu.Loizovik, A.Sigov, Th.Rasing, et.al., Switchable Nonlinear Metallo-Ferroelectric Photonic Crystals, *Appl.Phys.Lett.* 91, 041107 (2007).
26. O.L. Berman, Yu.E. Lozovik, D.W.Snoke, R.D.Coalson, Superfluidity of 'dirty' indirect magnetoexcitons in coupled quantum wells in high magnetic field, *J. Phys.: Condens. Matter* 19, 386219 (2007).
27. P. Ludwig, A. Filinov, Yu.E. Lozovik, H. Stolz, M. Bonitz, Crystallization in mass-asymmetric electron-hole bilayers, *Contrib. Plasma Phys.* 47, 335-344 (2007).
28. G. Semenov, Yu.E.Loizovik, On the superfluid properties of a polaritonic system, *Europhysics Letter*, 78, 67005(2007).
29. Yu. E. Lozovik, I. L. Kurbakov, and M. Willander, Superfluidity of two- dimensional excitons in flat and harmonic traps, *Phys. Lett. A* 366, No. 4-5, 487-492 (2007).
30. A.M. Popov, E. Bichoutskaia, Yu.E. Lozovik, A.S.Kulish, Nanoelectromechanical systems based on multi-shell nanotubes: nanothermometer, nanorelay and nanoactuator, *phys.stat.sol (a)* 204, No. 6, 1911-1917 (2007).
31. S.S.Kuznetsov, Yu.E.Loizovik, A.M.Popov, Nanoactuator based on nanotube, *Sol.St.Phys.* 49, No.5, 1004-1012(2007).
32. A.V.Belikov, M.V.Bogdanova, Yu.E.Loizovik, Calculation of band structures of metallic photon crystals: modified plane wave method, *Matematicheskoe Modelirovanie*, 19, No.4, 19-26 (2007).
33. A.M.Fedotov, N.B.Narozhny, A.N.Petrosyan, Yu.E.Loizovik, On the dynamical Casimir effect in a one-dimensional contracting cavity, *Laser Physics*, 17, No. 4, 310-315 (2007).
34. E. Bichoutskaia, A.M. Popov, Yu.E. Lozovik, G.S. Ivanchenko, N.G. Lebedev, Electromechanical nanothermometer, *Phys. Lett.A*366, No.4-5, 480-486 (2007).
35. O. V. Ershova, Yu. E. Lozovik, A. M. Popov, O. N. Bubel', N. A. Poklonski, E. F. Kislyakov, Control of the Motion of Nanoelectromechanical Systems Based on Carbon Nanotubes, *Physics of the Solid State*, Vol. 49, No. 10, pp. 2010–2014(2007).
36. Yu.E.Loizovik, A.M.Popov, Properties and nanotechnological applications of nanotubes, *Uspekhi Fiz.Nauk*, 177, N7, 786 -799(2007).
37. O.L.Berman, Yu.E.Loizovik,D.W.Snoke,R.D.Coalson, Superfluidity of dirty indirect excitons and magnetoexcitons in a two-dimensional trap, *Phys. Rev. B* 73, 235352 (2006).
38. E. Bichoutskaia, M.I. Heggie, A.M. Popov, and Yu.E. Lozovik, Interwall interaction and elastic properties of double-wall carbon nanotubes, *Phys. Rev. B* 73(4) 045435 (2006). (selected for the February 13, 2006 issue of *Virtual Journal of Nanoscale Science & Technology*).
39. G.E.Astrakharchik, D.M.Gangart, Yu.E.Loizovik, I.A.Sorokin, Off-diagonal correlations of the Calogero-Sutherland model, *Phys.Rev.E*74, 021105 (2006).
40. A.M.Fedotov, Yu.E.Loizovik, N.B.Narozhny, A.N.Petrosyan, Dynamical Casimir effect in one-dimensional uniformly contracting cavity, *Phys.Rev. A*74, 013806 (2006).

41. O. L. Berman, Yu. E. Lozovik, S. L. Eiderman and R. D. Coalson, Superconducting photonic crystals: Numerical calculations of the band structure, *Phys. Rev. B* 74, 092505 (2006).
42. Yu.E. Lozovik, A.G. Semenov, M. Willander, Kosterlitz-Thouless phase transition in microcavity polariton system, *JETP Lett.* 84, No.3, 176-179 (2006).
43. Ю.Е.Лозовик, С.Л.Эйдерман, Расчет зонного спектра трехмерных металлических фотонных кристаллов с помощью зависящих от времени уравнений Максвелла, *Мат. моделирование*, т.18 No.12, стр. 35-42 (2006).
44. Ю.Е. Лозовик, А.Г. Николаев, А.М. Попов, Нанозлектромеханические системы, основанные на нанотрубках, *ЖЭТФ* 130(3) 516-533 (2006).
45. Kaputkina N.E., Lozovik Yu.E., Willander M., Influence of the magnetic field on formation and spectrum of the exciton-polariton in a microcavity, *PHYSICA B-CONDENSED MATTER*, 378-80, 1049-1050 (2006).
46. Yu.E. Lozovik, A.G. Nikolaev, A.M. Popov, Bolt-and-nut pairs made from carbon nanotubes with artificial defects, *Fullerene, Nanotubes, and Carbon Nanostructures*, 14, Nos. 2-3, 227-231 (2006).
47. E. Bichoutskaia, M.I. Heggie, Yu.E. Lozovik, A.M. Popov, Diffusion of walls in double-walled nanotubes, *Fullerene, Nanotubes, and Carbon Nanostructures* 14, Nos.2-3, 215-220 (2006).
48. N.E. Kaputkina, Yu.E. Lozovik, Magnetic field influence on spectrum rearrangement and spin transformation of coupled quantum dots, *J. Phys.: Condens. Matter* 18 (2006) S2169-S2174.
49. E. Bichoutskaia, M.I. Heggie, Yu.E. Lozovik, A.M. Popov, Multi-walled nanotubes: commensurate-incommensurate phase transition and NEMS applications, *Fullerene, Nanotubes, and Carbon Nanostructures* 14, Nos. 2-3, 131-140 (2006).
50. N.E. Kaputkina, Yu.E. Lozovik, Magnetic field influence on excitons in coupled quantum wells and coupled quantum dots and on exciton polaritons in microcavities, *Phys.Stat.Sol.(c)*, v 3, No 10, pp.3500-3503, 2006.
51. O.L.Berman, Yu.E. Lozovik, D.W. Snoke, R.D. Coalson, Phase transitions of indirect excitons in coupled quantum wells: The role of disorder, *Physica E: Low-dim. Syst. Nanostr.*, vol.34, No.1-2, 268-271 (2006).
52. Yu.E. Lozovik, A.G. Nikolaev, A.M. Popov, Nanotube-based nanoelectromechanical systems, *JETP* 103, No.3, 447-459 (2006).
53. Filinov, P. Ludwig, Yu.E. Lozovik, M. Bonitz and H. Stolz, Strongly correlated indirect excitons in quantum wells in high electric fields, *J. Phys: Conf. Series*, 35, 197 (2006).
54. O.L.Berman, Yu.E. Lozovik, D.W. Snoke, Evaporating cooling and condensation of two-dimensional polaritons in an in-plane harmonic potential, *phys.stat.sol. (c)* 3, No.10, 3373-3377 (2006).
55. Filinov, M. Bonitz, P. Ludwig, and Yu.E. Lozovik, Path integral Monte Carlo results for Bose condensation of mesoscopic indirect excitons, *phys. stat. sol. c* 3, No. 7, 2457-2460 (2006).
56. Igor V. Ovchinnikov and Daniel Neuhauser, Bogoliubov-like mode in the Tonks-Girardeau Gas, *Europhys. Lett.* 74, No.5, 785-791 (2006).
57. Ovchinnikov I.V., Neuhauser D., Orbital-free tensor density functional theory, *J. Chem. Phys.*, 124, No.5, Art. No. 024105 (2006).
58. M. Bonitz, D. Block, O. Arp, V. Golubnychiy, H. Baumgartner, P. Ludwig, A. Piel, and A. Filinov, Structural properties of screened Coulomb balls, *Physical Review Letters*, 96, 075001 (2006).

59. V. Golubnychiy, H. Baumgartner, M. Bonitz, A. Filinov, and H. Fehske, Screened Coulomb balls - structural properties and melting behavior, J. Phys. A: Math. Gen.39, 4527 (2006).
60. W. Ebeling, A. Filinov, M. Bonitz, V. Filinov, and T. Pohl, The Method of Effective Potentials in the Quantum-Statistical Theory of Plasmas, J. Phys. A: Math. Gen., 39, 4309 (2006).
61. K. Balzer, C. N"olle, M. Bonitz, and A. Filinov, Energy spectrum of strongly correlated particles in quantum dots, J. Phys: Conf. Series 35, 209 (2006).
62. P. Ludwig, A. Filinov, M. Bonitz, and H. Stolz, Quantum Stark confined strongly correlated indirect excitons in quantum wells, phys. stat. sol. b 243, No.10, 2363 (2006).
63. K. Balzer, C. N"olle, M. Bonitz, and A. Filinov, Energy spectrum of strongly correlated electrons and indirect excitons in quantum dots, phys. stat. sol. c3, Issue 7, 2402-2405 (2006).
64. Astrakharchik G.E., Giorgini S., Correlation functions of a Lieb-Liniger Bose gas, JOURNAL OF PHYSICS B-ATOMIC MOLECULAR AND OPTICAL PHYSICS 39, No.10 Sp. Iss., S1-S12, (2006).
65. G.E.Astrakharchik, J.Boronat, I.L.Kurbakov, Yu.E.Loikov, Quantum phase transition in a two-dimensional system of dipoles, cond-mat/0608246.
66. G.E. Astrakharchik, J. Boronat, J. Casulleras, I.L. Kurbakov, Yu.E. Loikov, Weakly interacting two-dimensional system of dipoles: limitations of mean-field theory cond-mat/0612691.
67. Alexei Filinov, Jens Boning, Michael Bonitz, Path integral Monte Carlo simulation of charged particles in traps, cond-mat/0611558.
68. P. Ludwig, A. Filinov, Yu.E. Loikov, H. Stolz, M. Bonitz, Crystallization in mass-asymmetric electron-hole bilayers, cond-mat/0611556. (in print)
69. I.V. Ovchinnikov and Daniel Neuhauser, Orbital-Free Tensor-DFT at the N=3 level, J. Chem.Phys.(in print)
70. Christopher Liu, Joe Speyer, I.V. Ovchinnikov and Daniel Neuhauser, Nonlinear Signal Mixing in a Three-Terminal Molecular Wire, J. Chem.Phys. (in print).
71. Yu.E.Loikov, V.A.Nadtochenko, O.M.Sarkisov et.al., Time resolved spectroscopy of nanotubes, Chem.Phys.Lett. (submitted).
72. Ю.Е. Лозовик, А.Л. Меркулов, С.П. Меркулова, А.Колесников, Плазменные моды и ближние поля вблизи иглы сканирующего зондового микроскопа и их использование в нанооптике, Оптика и спектроскопия (в печати).
73. V.A. Nadtochenko, Yu.E. Loikov, O.M.Sarkisov et.al., Femtosecond dynamics in nanotubes and role of excitons, Laser Phys. (to be publ).
74. Filinov, et.al. Energy spectrum of strongly correlated electrons and indirect excitons in quantum dots, phys. stat. sol. c 3, No.7, 2402-2405 (2006).
75. Yu.E. Loikov, S.Y. Volkov, Motion of a 3D exciton in a magnetic field: Exciton-magnetoexciton "phase" transition, J. Exp. Theor. Phys., 96, N3, 564-571 (2003).
76. Yu.E. Loikov, A.V.Minogin, A.M.Popov, Nanomachines Based on Carbon Nanotubes, Phys. Lett. A 313, No1-2, 112 – 121(2003).
77. A.V.Filinov, M. Bonitz, and Yu.E. Loikov, Excitonic clusters in coupled quantum dots, J. Phys. A: Math. Gen., 36, No.22, 5899-5904, (2003).
78. Bereiter-Hahn J, Blase C, Loikov YE, et. al., Study of surface plasmons with a scanning acoustic microscope, QUANTUM ELECTRON., 33, No.5, 451-455 (2003).
79. Ключник А.В., Курганов С.Ю., Лозовик Ю.Е. Плазменная оптика наноструктур, ФТТ, том 45, выпуск 7, 1267(2003).

80. Klyuchnik AV, Kurganov SY, Lozovik YE, Plasmons at a hole in a screen, *PHYS. SOLID STATE*, 45, No.9, 1793-1797 (2003).
81. Lozovik YE, Mur VD, Narozhnyi NB, $1/Q$ expansion for the energy spectrum of quantum dots, *J. EXP. THEOR. PHYS.*, 96, No. 5, 932-939 (2003)
82. Lozovik YE, Minogin AV, Popov AM, Possible nanomachines: Nanotube walls as movable elements, *JETP LETT.*, 77, No.11, 631-635 (2003).
83. Yu.E. Lozovik, I.L. Kurbakov, I.V. Ovchinnikov, Nonlinear optical phenomena in coherent phase of 2D exciton system, *Sol. State. Comm.*, 126, No 5, 269-273 (2003).
84. Yu.E. Lozovik, A.V. Filinov, A.S. Arkhipov, Simulation of wave packet tunneling of interacting identical particles, *Phys. Rev.*, E 67, No2, 026707 (2003).
85. NB Narozhnyi, AM Fedotov, Yu.E. Lozovik, Dynamical Casimir and Lamb effects and entangled photon states, *Laser Phys*, 13, No2, 298-304 (2003).
86. Yu.E. Lozovik, S.Yu. Volkov, M. Willander, Crystallization and quantum melting of few electron system in a spherical quantum dot: quantum Monte Carlo simulation, *Sol. State. Comm.*, 125, No2, 127-131(2003).
87. Yu.E.Loizovik, I.V.Ovchinnikov, S.Yu.Volkov, L.V.Butov and D.S.Chemla, Quasi-two-dimensional excitons in finite magnetic fields, *Phys.Rev.B* 65, 235304 (2002).
88. Yu. E. Lozovik, O.L.Berman, M.Willander , Superfluidity of indirect excitons and biexcitons in coupled quantum wells and superlattices , *J. Phys.: Condensed Matter*, v.14, 12457-12475 (2002)
89. M.V.Demin, Yu.E.Loizovik, V.A.Sharapov, Drag effect of Bose –condensate in the system of two coupled traps, *Pis'ma ZhETF* 76, N3, 166-170 (2002).
90. P.A. Sundqvist, S.Yu.Volkov, Yu.E.Loizovik, M.Willander, Phase transitions of a few electron system in a spherical quantum dot, *Phys.Rev. B* 66, N7, 075335(2002).
91. Yu.E.Loizovik and I.V.Ovchinnikov, Many-photon coherence of Bose-condensed excitons: luminescence and related nonlinear optical phenomena, *Phys.Rev.B* 66, 075124 (2002).
92. N.E. Kaputkina, Yu.E.Loizovik, Two-dimensional exciton with spatially-separated carriers in coupled quantum wells in external magnetic field, *Physica E* 12, 323-326(2002).
93. Yu.E.Loizovik and I.V.Ovchinnikov, Stimulated multiphoton emission from exciton Bose-condensate, *JETP Lett.* 75, 10, 705 (2002).
94. D.V.Kulakovskii, S.I.Gubarev, Yu.E.Loizovik, Properties of the excitonic states in quantum wells GaAs/AlGaAs in the presence of quasi two-dimensional electron gas, *JETP*, 94 , N4, 785-793 (2002).
95. Yu.E.Loizovik, N.B. Narozhnyi, A.M.Fedotov, Dynamical Lamb effect versus dynamical Casimir effect, *Proc. SPIE* (in print).
96. Yu. E. Loizovik, V. A. Sharapov, Excitation of atom by image forces , *Phys. Lett A* 293, N3-4, 191-194(2002).
97. Yu.E. Loizovik , A.L. Dobryakov, S.A. Kovalenko, S.P.Merkulova, S. Yu. Volkov, M.Willander, Study of Localization of Carriers in Disordered Semiconductors by Femtosecond Spectroscopy, *Laser Physics* , 12, N4, 802(2002).
98. M.Bonitz, V. Golubichniy, A.V.Filinov, Yu.E.Loizovik, Single-electron control of Wigner crystallization, *Microelectronic Engineering* 63, N1-3, 141-145(2002).
99. Yu.E. Loizovik, S.P. Merkulova, M.M. Nazarov, A.P. Shkurinov, and P.Masselin, Time resolved nonlinear surface plasmon optics, *Pis'ma ZhETF*, 75, N9, 551-554 (2002).
100. Yu.E.Loizovik, Controlling Bose-condensation of excitons and phonon laser, *Uspekhi Fiz. Nauk* 171, N12, 1373-1376(2001).
101. N.B.Narozhnyi, A.M.Fedotov and Yu.E.Loizovik, Dynamical Lamb effect *versus* dynamical Casimir effect, *Phys. Rev. A*.64, 053807 (2001).

102. Yu.E. Lozovik , I.V. Ovchinnikov, Light backscattering from exciton Bose-condensate, *Pis'ma v ZhETF* 74, 318-322 (2001).
103. A.L. Dobryakov, S.A. Kovalenko, Yu.E. Lozovik et al., Femtosecond spectroscopy of relaxation processes in metals and High-T-c superconductors, *J. Exp. Theor. Phys.*, 92, N2, 267-276 (2001).
104. Yu.E. Lozovik, I.V. Ovchinnikov, Controlling spatially indirect exciton condensate in coupled quantum wells by external fields and phonon laser, *Sol. St. Comm.*, 118, N5, 251-255(2001).
105. Yu.E. Lozovik, S.P. Merkulova, I.V. Ovchinnikov, Sasers: resonant transitions in narrow-gap semiconductors and in exciton system in coupled quantum wells, *Phys. Lett. A* 282, N6, 407-414(2001).
106. Yu.E. Lozovik, I.V. Ovchinnikov I.V., Cooling of excitons by coherent phonon radiation, *JETP Lett*, 73, N10, 524-528(2001).
107. D.V. Kulakovskii, S.I. Gubarev, Yu.E. Lozovik , Screening of exciton states by quasi-two-dimensional electron gas in quantum wells, *JETP Lett.*, 74, N 2, 118-121 (2001).
108. L.V. Butov, C.W. Lai, D.S. Chemla, Yu.E. Lozovik, K.L. Campman, and A.C. Gossard, Observation of magnetically-induced effective mass enhancement of quasi 2D-excitons , *Phys.Rev.Lett.*87, No. 21, 216804 (2001).
109. A.V. Filinov, M. Bonitz, Yu.E. Lozovik , Wigner crystallization in mesoscopic 2D electron systems, *Phys. Rev. Lett.*, 86, N17, 3851-3854(2001).
110. A.L.Dobryakov, S.A.Kovalenko, V.M.Farztdinov, S.P.Merkulova, N.P.Ernsting, Yu.E.Loosovik, Ultrafast relaxation in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ on the femtosecond scale: Luttinger or two-dimensional Fermi liquid?", *Sol.St.Comms.*116, 439 (2000).
111. Yu.E.Loosovik, A.M.Popov, Orientational melting of two-shell nanoparticles: molecular dynamics study, *Chem. Phys. Lett.* 328, 355-362 (2000).
112. Yu.E.Loosovik, S.P.Merkulova, M.M.Nazarov, A.P.Shkurinov, From two-beam surface plasmon interaction to femtosecond surface optics and spectroscopy, *Phys. Lett.A.* A.276, N1-4, 127-132 (2000).
113. Yu.E.Loosovik, M.Willander, Excitons and magnetoexcitons in coupled quantum nanostructures: the role of a dirty environment, *Appl. Phys.*, A 71, 379-390 (2000).
114. Yu.E.Loosovik, N.B.Narozhny, A.M.Fedotov, Excitation of atom in nonstationary cavity, *Pis'ma v ZhETF* 72, 344-349 (2000).
115. Yu.E.Loosovik, I.V. Ovchinnikov, Phonon laser and indirect exciton dispersion engeneering, *Pis'ma v ZhETF* 72, N 8, 617 (2000).
116. S.V.Lavrishev, S.P.Merkulova, A.L.Leonov, A.L.Merkulov, Yu.E.Loosovik, Electronic micromirror, *Physica Scripta*, 61, 187-191(2000).
117. D.B.Balagurov, A.V.Klyuchnik, Yu.E.Loosovik, Theory of scanning capacitance microscopy, *Physics of Solid State*, 42, N2, 371-376(2000); Transl. from: *Fiz.Tverd.Tela*, 42, N2, 361-366(2000).
118. S.A.Verzakov, Yu.E.Loosovik, Investigation of array of mesoscopic grains in the framework of quantum cosine model, *Physics of Solid State*, 42, N3, 409-414(2000); Transl. from *Fiz.Tverd.Tela* 42, N3, 400-406(2000).
119. A.L.Dobryakov, V.A.Karavinskii, S.A.Kovalenko, S.P.Merkulova, Yu.E.Loosovik, Observation of coherent phonon states in porous silicon fields, *JETP Lett.* 71, N7, 298-302 (2000) (Transl. from *Pis'ma ZhETF* 71, N7, 430-436 (2000)).
120. A.I.Belousov, Yu.E.Loosovik, Mesoscopic and macroscopic dipole clusters: structure and phase transitions, *Eur. Phys. D* 8, 251-264 (2000).
121. D.B. Balagurov, Yu.E.Loosovik, Fermi surface of composite fermions and one-particle excitations at $\nu=1/2$: effect of band-mass anisotropy, *Phys. Rev B* 61, 1481-1484

(2000).

122. L.V.Butov, A.V.Mintsev, Yu.E.Loikov, K.L.Campman, A.C.Gossard, From spatially indirect excitons to momentum - space indirect excitons by an in-plane magnetic field, Phys. Rev B 62, N3, 1548-1551(2000).

123. S.A. Kovalenko, A.L. Dobryakov, V.A.Karavanskii, D.V.Lisin, S.P.Merkulova, Yu.E. Loikov, Femtosecond spectroscopy of porous silica, Physica Scripta 60, N6, 589-593(1999).

124. A.L.Dobryakov, V.M.Farzdinov, Yu.E. Loikov, Linear electromagnetic response of the nonlocal superconductor: explicit analytical results, Physica Scripta 60, (1999).

125. V.M.Farzdinov, A.L.Dobryakov, S.A. Kovalenko, D.V.Lisin, S.P.Merkulova, F.Pudonin, Yu.E. Loikov, Ultrafast phenomena in copper films, Physica Scripta 60, N6, 579-584(1999).

126. A.L.Dobryakov, V.M.Farzdinov, Yu.E.Loikov, G.Marowsky, Laser-induced nonequilibrium electron distribution in metals on a femtosecond time scale, Phys.Scripta, 60, N6, 572-579(1999).

127. S.P.Merkulova, A.L.Merkulov, S.V.Lavrishchev, Yu.E.Loikov, Cavitation processes in solids induced by laser pulses, Physica Scripta 60, N6, 547-549(1999).

128. I.V.Kukushkin, K.von Klitzing, K.G.Levchenko, Yu.E.Loikov, Temperature dependence of the spin polarization of composite fermion, JETP Lett. 70, N11, 722-726(1999).

129. E.A.Vinogradov, A.L.Dobryakov, V.M.Farzdinov, Yu.E.Loikov, Yu.A.Matveets and S.A.Kovalenko, Femtosecond dynamics of semiconductor microcavity polaritons, Proceed. SPIE 3735, 105-112(1999).

130. Loikov Yu.E., Merkulova S.P., The outlook for nanolocal femtosecond spectroscopy and nanolithography, Uspekhi Fiz.Nauk 169, N3, 348-350(1999). (transl.:Physics-Uspekhi 42, N3 (1999)).

131. Yu.E.Loikov, D.V.Lisin, V.O.Kompanets, S.P.Merkulova, et.al., Femtosecond laser pulse nanolithography using STM tip, in "Fundamental Aspects of Laser-Matter Interaction", ed.K.N.Drobovich, Proc.SPIE, 3734, 424-431(1999).

132. Yu.E.Loikov, S.A.Verzakov, M.Willander, Superfluidity of indirect excitons in a quantum dot, Phys.Lett.A 260 400-405(1999).

133. Yu.E.Loikov, E.A.Rakoch, Characteristic features of the melting of two-dimensional mesoscopic Wigner clusters, Phys.Solid State 41, N8, 1373-1377(1999).

134. Yu.E. Loikov, Lisin D.V., Ivanov A.I., Kompanets V.O., Yu.A.Matveets, Chekalin S.V., Merkulova S.P., Femtosecond laser pulse nanolithography using on STM tip, Laser Phys. 9, N2, 564-569(1999).

135. Loikov Y.E., Klyuchnik A.V., Merkulova S.P., Nanolocal optical study and nanolithography using scanning probe microscope, Laser Phys. 9, N2, 552-556(1999).

136. Yu.E.Loikov, Klyuchnik A.V., Balagurov D.B., Local capacitance spectroscopy, Phys.Scripta, 59, No.4, 319-322(1999).

137. Yu.E.Loikov, M.M.Nazarov, A.P.Shkurinov, Effect of edge plasmon excitation at metal grating on the second harmonic generation of light, Physica Scripta 60 N1, 60-62(1999).

138. Yu.E.Loikov, A.V.Filinov, Transmission time of wave packets through tunnelling barriers, JETP 88 N5, 1026-1035(1999).

139. G.E.Astrakharchik, A.I.Belousov, Yu.E.Loikov, Properties of two-dimensional dusty plasma clusters, Phys.Lett.A 258, N2-3, 123-130(1999). JETP 116, v.4(10), (1999).

140. Yu.E.Loikov, M.V.Nikitkov, Kinetic properties of the spatially-separated

excitons system and electrons with the Bose-exciton condensation, JETP, 116, N4 (10), 1440(1999).

141. Yu.E.Loikov, E.A.Rakoch, Structure, melting and potential barriers in mesoscopic clusters of repulsing particles, J. Exp. Theor. Phys., 89, N6, 1089-1102 (1999).

142. Yu.E. Loikov, O.L.Berman, M.Willander, Superfluidity of indirect biexcitons in superlattices, Europhys.Lett. 48 N3, 299-305(1999).

143. A.L.Dobryakov, Yu.E.Loikov, The new optical method of the parameter measurement of electron-phonon interaction across the spectrum dependence of a relaxation rate, JETP Lett., 70, N5, 329-332(1999).

144. Yu.E.Loikov, O.L.Berman, A.M.Ruvinskii, Superfluidity of "dirty" excitons, JETP Lett., 69, N8, 616-622(1999).

145. Loikov Y.E., Berman O.L., Tsvetus V.G., Phase transitions of electron -hole and unbalanced electron systems in coupled quantum wells in high magnetic fields, Phys.Rev.B, 59, No.8, 5627-5636(1999).

146. Yu. E. Loikov, A. V. Poushnov, Manifestation of exciton Bose condensation in induced two-phonon emission and Raman scattering, Phys.Rev. B 58, N10, 6608-6621(1998).

147. Yu.E.Loikov, A.M.Ruvinsky, Transport of magnetoexcitons in single and coupled quantum wells, Physica Scripta 58, N1, 90-96(1998).

148. Yu.E.Loikov, A.M.Ruvinsky, Magnetoexciton light absorption in inhomogeneous quasi- two- dimensional systems, JETP 87, N4, 788-795(1998).

149. Yu.E.Loikov, O.L.Berman, The quantum crystallization of indirect excitons in coupled quantum wells, Physica Scripta 58, N1, 86-89(1998).

150. Yu.E.Loikov, A.M. Popov, Theory, simulation and nanotechnological applications of adsorption on a surface with defects, Surface Science 414, N1-2 57-67(1998).

151. Yu.E.Loikov, E.A.Rakoch, Energy barriers, structure and two stage melting of vortexes, Phys. Rev. B 57, N2, 1214-1225 (1998).

152. A.I.Belousov, Yu.E.Loikov, Quantum orientational melting and the phase diagram of a mesoscopic system, JETP Lett. 68, N11, 858-863(1998).

153. A.I.Belousov, Yu.E.Loikov, The new model system of mesoscopic Josephson junctions, JETP Lett. 66, N10, 649-654(1998).

154. A.I.Belousov, S.A.Verzakov, Yu.E.Loikov, Josephson array of mesoscopic objects. Modulation of system properties through the chemical potential, JETP 114(2), 322-328(1998).

155. A.I.Belousov, S.A.Verzakov, Yu.E.Loikov, Phase diagram of 2D array of mesoscopic granules, J. Phys. C 10, N5, 1079-1089(1998).

156. Yu.E.Loikov, A.V.Poushnov, Magnetism and Josephson effect in the coupled quantum well electron-hole system, Phys. Lett. A 228, 399-407(1997).

157. Zh.S.Gevorkyan, Yu.E.Loikov, Light backscattering in a two-dimensional random system, Phys.Scripta 56(2), 208-211(1997).

158. Yu.E.Loikov, O.L.Berman, V.G.Tsvetus, Superfluidity of indirect magnetoexcitons in coupled quantum wells, JETP Lett. 66, N 5, 332-337(1997).

159. Yu.E.Loikov, O.L.Berman, Metal-insulator transition in a two-layered electron-hole system, Solid State Phys. 39, N9, 1476-1478(1997).

160. Yu.E.Loikov, O.L.Berman, Phase transitions in the system of spatially separated electrons and holes, JETP 84, N 5, 1027-1035(1997).

161. N.K.Kultanov, Yu.E.Loikov, The vortex-loop phase transition in the anisotropic 3D X-Y model, the role of screening and the polymer physics approach,

Physica Scripta 56, N2, 129-136(1997).

162. V.M.Farzdinov, A.L.Dobryakov, V.S.Letokhov, S.A.Kovalenko, Yu.E.Loikov, Yu.A.Matveets, N.P.Ernsting, Spectral dependence of femtosecond relaxation and coherent phonons excitation in C_{60} films, Phys. Rev. B 56(7), 4176-4185(1997).

163. Yu.E.Loikov, M.V.Nikitkov, Drag effects in a two-layer system of spatially separated electrons and excitons, JETP 84(3), 612-618(1997).

164. Yu.E. Loikov, O.L.Berman, Phase transitions in the system of two coupled quantum wells, JETP Lett. 64(8), 573 (1996).

165. Yu.E.Loikov, Clusters in confined potentials, Izvestiya RAN, Phys. 60(9), 85-91(1996).

166. N.K.Kultanov, Yu.E.Loikov, The critical behavior of the 3D X-Y model and its relation with fractal properties of the vortex excitations, Phys.Lett.A 223, N3, 189-194(1996).

167. Ю.Е.Лозовик, Ионные и электронные кластеры, УФН, 153, N2, 356-358(1987).

168. Yu.E.Loikov, A.V.Klyuchnik, The dielectric function and collective oscillations in inhomogeneous systems, in: The Dielectric Function of Condensed Systems, edited by L.V.Keldysh, D.A.Kirzhnits and A.A.Maradudin, Elsevier Science Publisher B.V., Chapter, 1987.

169. Ю.Е.Лозовик, Кластеры в удерживающих потенциалах, Известия РАН, Серия физическая 60(9), 72-80(1996).

170. Ю.Е.Лозовик, А.М.Попов, Образование и рост углеродных наноструктур - фуллеренов, наночастиц, нанотрубок и конусов, УФН 167 (7), 751-774(1997).

171. Yu.E.Loikov, A.M.Popov, Formation of fullerenes, onions, and other nanometer size carbon clusters, in: Physics of Clusters, eds. G.N.Chuev, V.D.Lakhno, World Scientific Publishing, Singapore, 1-55(1998).

172. N.K.Kultanov, Yu.E.Loikov, The critical behavior of the 3D X-Y model and its relation with fractal properties of the vortex excitations, Phys.Lett.A 223, N3, 189-194(1996).

173. Ю.Е.Лозовик, О.Л.Берман, Фазовые переходы в системе из двух связанных квантовых ям, Письма в ЖЭТФ 64(8), 526-531(1996).

174. Ю.Е.Лозовик, М.В.Никитков, Эффекты увлечения в двуслойной системе пространственно-разделенных электронов и экситонов, ЖЭТФ 111(3), 1107-1119(1997).

175. Ю.Е.Лозовик, А.М.Рувинский, Магнитоэкситонное поглощение в связанных квантовых ямах, ЖЭТФ 112(11) 1791-1808(1997).

176. Yu.E.Loikov, S.P.Merkulova, A.L.Merkulov, Pulsed laser radiation used for multiple-spot welding, in: Laser Applications Engineering, Proc.SPIE, 3091, 13-15(1997).

177. Ю.Е.Лозовик, О.Л.Берман, Фазовые переходы в системе пространственно-разделенных электронов и дырок, ЖЭТФ 111 (5), 1879-1895(1997).

178. Zh.S.Gevorkyan, Yu.E.Loikov, Light backscattering in a two-dimensional random system, Phys.Scripta 56, N2, 208-211(1997).

179. А.И.Белоусов, Ю.Е.Лозовик, Новая модель систем мезоскопических джозефсоновских контактов, Письма в ЖЭТФ 66(10), 649-653(1997).

180. Yu.E. Loikov, A.V. Poushnov, Magnetism and Josephson effect in the coupled quantum well electron-hole system, Phys. Lett. A 228, 399-407(1997).

181. Yu.E.Loikov, E.A.Rakoch, Energy barriers, structure and two stage melting of microclusters, Phys.Rev.B, 57, N3, 1214-1225 (1998).

182. Yu.E.Loikov, E.A.Rakoch, Coulomb clusters: melting and potential barriers, Phys.Lett.A 240, 311(1998).
183. A.I.Belousov, S.A.Verzakov, Yu.E.Loikov, Phase diagram of 2D array of mesoscopic granules, J. Phys. C 10, 1079-1089(1998).
184. А.И.Белоусов, С.А.Верзакон, Ю.Е.Лозовик, Джозефсоновский массив мезоскопических объектов. Модуляция свойств системы химическим потенциалом, ЖЭТФ 114(1/8), 591-604(1998).
185. Yu.E.Loikov, A.V.Poushnov, Manifestation of exciton Bose condensation in induced two-phonon emission and Raman scattering, Phys.Rev. B 58, N10, 6608-6621(1998).
186. Yu.E.Loikov, O.L.Berman, Phase transition of electron-hole and unbalanced electron systems in coupled quantum wells in high magnetic fields, Phys.Rev. B 59,5627(1999).
187. Yu.E.Loikov, A.V.Klyuchnik, D.B.Balagurov, Local capacitance spectroscopy, Phys.Scr., 59,319-322(1999).
188. Ю.Е.Лозовик, А.В.Филинов, Время прохождения волновых пакетов через туннельные барьеры, ЖЭТФ, 115, 1872-1889 (1999).
189. Ю.Е.Лозовик, В.И.Юдсон, Кристаллизация двумерного электронного газа в магнитном поле, Письма в ЖЭТФ 22, N1, 26-28(1975).
190. Ю.Е.Лозовик, Д.Р.Мусин, В.И.Юдсон, Область существования двумерного электронного кристалла в сильном магнитном поле, ФТТ 21, N7, 1974-1977(1979).
191. Yu.E.Loikov, S.M.Apenko, A.V.Klyuchnik, Two - dimensional electron crystal in the magnetic field, Topological phase transitions and stability region, Sol. St. Commun., 36, N6, 485-494.
192. Yu.E.Loikov, V.M.Farztdinov, Oscillation spectra and phase diagram of two - dimensional electron crystal: "new" (3+4) - self-consistent approximation, Sol. St. Commun. 54, N8, 725- 728(1985).
193. Yu.E.Loikov, V.M.Farztdinov, B.Abdullaev, 2D electron crystal in quantized magnetic fields: melting induced by zero-point oscillations, J.Phys.C18, N26, L807-L811(1985).
194. В.М.Беданов, Г.В.Гадияк, Ю.Е.Лозовик, Плавление двумерных кристаллов, ЖЭТФ, 88, N5, 1622-1633(1985).
195. A.V.Filinov, Yu.E.Loikov, M.Bonitz, Wigner crystallization in quantum confined systems, Phys. Rev. Lett. 86, N17, 3851-3854(2001).
196. Ю.Е.Лозовик, Ионные и электронные кластеры, УФН, 153, N2, 356-358(1987).
197. Yu.E.Loikov, V.A.Mandel'shtam, Coulomb clusters in a trap, Phys. Lett. A145, N5, 269-271(1990).
198. Yu.E.Loikov, N.E.Kaputkina, Quantum "crystallization" in quantum dot in a magnetic field, Phys. Scr., 57, N4, 538-541(1998).
199. И.В.Лернер, Ю.Е.Лозовик, Квазидвумерная электронно - дырочная жидкость в сильных магнитных полях, ЖЭТФ 74, N1, 274-287(1978).
200. И.В.Лернер, Ю.Е.Лозовик, Фазовая диаграмма квазиульмерной электронно - дырочной системы, Письма в ЖЭТФ 27, N9, 497-499(1978).
201. И.В.Лернер, Ю.Е.Лозовик, Термодинамика электронов в квантованной полуметаллической пленке в сильном магнитном поле, ЖЭТФ 76, N3, 1136-1150(1979).

202. И.В.Лернер, Ю.Е.Лозовик, Влияние корреляционных эффектов на фазовые переходы в квазидвумерных полуметаллах в сильном магнитном поле, ЖЭТФ 82, N4, 1188-1203(1982).
203. И.В.Лернер, Ю.Е.Лозовик, Двумерные электронно - дырочные системы в сильном магнитном поле как почти идеальный газ экситонов, ЖЭТФ 80, N4, 1488-1503(1981).
204. А.В.Дзюбенко, Ю.Е.Лозовик, Точные решения и преобразования Боголюбова для квазинульмерных электронно-дырочных систем, ФТТ, 25, N5, 1519-1521(1983).
205. А.Б.Дзюбенко, Ю.Е.Лозовик, Квазидвумерный конденсат электронно – дырочных пар в сильных магнитных полях, ФТТ, 26,N5, 1540-1541(1984).
206. A.B.Dzyubenko, Yu.E.Loikov, Symmetry of Hamiltonians of quantum two - component systems: condensate of composite particles as an exact eigenstate, J. Phys. A 24, 415-424(1991).
207. И.В.Лернер, Ю.Е.Лозовик, Экситон Мотта в квазидвумерных полупроводниках в сильном магнитном поле, ЖЭТФ 78, N3, 1167-1175(1980).
208. Ю.Е.Лозовик, А.М.Рувинский, Магнитоэкситонное поглощение в связанных квантовых ямах, ЖЭТФ, 112(11), 1791-1808(1997).
209. Ю.Е.Лозовик, А.М.Рувинский, Магнитоэкситонное поглощение света в неоднородных квазидвумерных системах, ЖЭТФ, 114, N4, 1451-1465(1998).
210. L.V.Butov, A.V.Mintsev, Yu.E.Loikov, K.L.Campman, A.C.Gossard, From spatially indirect excitons to momentum - spase indirect excitons by an in-plane magnetic field, Phys.Rev.B 62, N3, 1548-1551(2000).
211. L.V. Butov, C.W. Lai, D.S. Chemla, Yu.E. Loikov, K.L. Campman, and A.C. Gossard, Observation of magnetically-induced effective mass enhancement of quasi 2D-excitons, Phys.Rev.Lett.87, No. 21, 216804 (2001).
212. Ю.Е.Лозовик, В.И.Юдсон, О возможности сверхтекучести разделенных в пространстве электронов и дырок при их спаривании: новый механизм сверхпроводимости, Письма в ЖЭТФ 22, N11, 556-559(1975).
213. Ю.Е.Лозовик, В.И.Юдсон, Новый механизм сверхпроводимости: спаривание между пространственно-разделенными электронами и дырками, ЖЭТФ 71, N2(8), 738-753(1976).
214. Ю.Е. Лозовик, О.Л. Берман, Фазовые переходы в системе из двух связанных квантовых ям, Письма в ЖЭТФ, 64(8), 526-531(1996).
215. Ю.Е.Лозовик, О.Л.Берман, Фазовые переходы в системе пространственно-разделенных электронов и дырок, ЖЭТФ, 111 (5), 1879-1895(1997).
216. 28. Ю.Е.Лозовик, О.Л.Берман, Сверхтекучесть не прямых биэкситонов в сверхрешетках, ЖЭТФ, 115, N5, 1786-1799(1999).
217. Loikov Y.E., Berman O.L., Tsvetus V.G., Phase transitions of electron- hole and unbalanced electron systems in coupled quantum wells in high magnetic fields, Phys.Rev.B59, N8, 5627-5636(1999).
218. Ю.Е.Лозовик, М.В.Никитков, Эффекты увлечения в двуслойной системе пространственно-разделенных электронов и экситонов, ЖЭТФ, 111(3), 1107-1119(1997).
219. Ю.Е.Лозовик, М.В.Никитков, Кинетические свойства системы пространственно- разделенных экситонов и электронов при наличии бозе-конденсата экситонов, ЖЭТФ, 116,N4(10), 1440(1999).
220. Ю.Е.Лозовик, Бозе-конденсация экситонов и фононный лазер, УФН, 171, N 12, 1373-1376(2001).

221. Yu.E.Loikov, M.Willander, Excitons and magnetoexcitons in coupled quantum nanostructures: the role of a dirty environment, *Appl. Phys.*, A 71, 379-390 (2000).
222. Ж.С.Геворкян, Ю.Е.Лозовик, Локализация и спектр экситонов в неупорядоченных системах, *ФТТ*, 27, N6, 1800-1806(1985).
223. Ю.Е.Лозовик, О.Л.Берман, А.М.Рувинский, "Сверхтекучесть" грязных экситонов, *Письма в ЖЭТФ*, 69, N8, 573-578(1999).
224. Лозовик Ю.Е., Пушнов А.В. Новый метод обнаружения Бозе-конденсации экситонов с помощью индуцированного двухфотонного испускания, *ЖЭТФ*, 115, N4, 1353-376(1999).
225. А.В.Ключник, Ю.Е.Лозовик, Влияние межзонных переходов на токовые состояния в системах со спариванием электронов и дырок, *ЖЭТФ*, 76, N2, 670-686(1979).
226. С.М.Апенко, Ю.Е.Лозовик, О квантовании холловской проводимости двумерного электронного газа в сильном магнитном поле, *ЖЭТФ* 89, N2(8), 573-588(1985).
227. Ю.Е.Лозовик, В.М.Фарзтдинов, Ж.С.Геворкян, Динамический квантовый эффект Холла, *Письма в ЖЭТФ* 39, N4, 153-155(1984).
228. A.I.A.Andreev, Ya.M.Blanter, Yu.E.Loikov, Microscopic theory of excitations of a quantum theory of excitations of a quantum dot in strong magnetic field, *Sol. St. Commun.* **91**, N7, 581-585(1994).
229. Ya.M.Blanter, Yu.E.Loikov, Coulomb renormalization of drift excitation frequencies in finite electronic systems in the quantum Hall effect regime, *Physics* **B182**, 254-260(1992).
230. А.Б.Дзюбенко, Ю.Е.Лозовик, Локализованные магнитоплазменные и спиновые возбуждения в двумерной электронной системе в сильном магнитном поле, *ЖЭТФ*, **104**, вып.4(10), 3416-3433 (1993).
231. А.А.Белов, Ю.Е.Лозовик, Газ анионов на решетке, *ЖЭТФ*, **100**, N1, 339-347(1991).
232. A.A.Belov, K.D.Challtikian, Yu.E.Loikov, Gapless edge excitations in the fractional quantum Hall effect and conformal invariance, *Intern. J. Modern Phys.B6*, N19, 3189-3204(1992).
233. D.B. Balagurov, Yu.E.Loikov, Fermi surface of composite fermions and one-particle excitations at $V=1/2$: effect of band-mass anisotropy, *Phys.Rev.***B62**, N3, 1481-1484(2000).

Монографии и обзоры, опубликованные в последние годы

1. Ю.Е. Лозовик, С.П. Меркулова, А.А. Соколик, *Коллективные электронные явления в графене*, УФН, т. 178, № 7, 756-776 (2008).
2. V. Filinov, Yu.Loikov, M.Bonitz, Quantum Molecular Dynamics, *Chapter 6* in "Introduction to Computational Methods in Many Body Physics", eds. M.Bonitz, D. Semkat, Rinton Press, 2007.
3. Ю.Е.Лозовик, А.М.Попов, Свойства и нанотехнологические применения нанотрубок, УФН, 177, 786 (2007).

ЛАБОРАТОРИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ МЕТОДОВ СПЕКТРОСКОПИИ И ИНТЕГРИРОВАННАЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА

Важнейшим сегментом деятельности Института является реализация интегрированной системы подготовки высококвалифицированных научных кадров. Институт имеет большой научный и образовательный потенциал. Из 113 научных сотрудников Института 45 - кандидаты наук, 30 – имеют степень доктора наук, 9 - звание профессора. Со времени основания в 1968 году Институт спектроскопии является базовой организацией кафедры квантовой оптики Московского физико-технического института (МФТИ). Под руководством научных сотрудников Института работают также студенты и аспиранты физического факультета МГУ им. Ломоносова, МИФИ, МИСиС и других вузов. На основании лицензии №165217 от 26.02.2006 г., выданной ИСАН Федеральной службой по надзору в сфере образования и науки РФ, обучение в аспирантуре ведется по 4 специальностям: «Теоретическая физика» (01.04.02), «Оптика» (01.04.05), «Физика конденсированного состояния» (01.04.07) и «Лазерная физика» (01.04.21).

Базовая кафедра квантовой оптики ежегодно выполняет педагогическую работу в объеме 1018 часов, в том числе: 464 лекционных часа, 507 часов лабораторных работ, 47 часов практических занятий. Сотрудники Института - доктора и кандидаты физико-математических наук – читают студентам следующие курсы лекций:

- III курс – экспериментальные методы квантовой оптики (два семестра);
- IV курс – физика лазеров (два семестра), атомная спектроскопия (два семестра), физическая оптика (два семестра);
- V курс – лазерная спектроскопия (один семестр), молекулярная спектроскопия (два семестра), спектроскопия твердого тела (два семестра), квантовая теория излучения (два семестра).



Индивидуальные занятия со студентами III курса МФТИ в лаборатории ЭМС проводят научные сотрудники ИСАН

Кандидатские экзамены по специальности и зачеты по информатике и вычислительной технике принимаются соответствующими комиссиями в ИСАН.

Студенты III курса выполняют в ИСАН практические работы в лаборатории Экспериментальных методов спектроскопии на установках, спроектированных и созданных сотрудниками Института и на средства Института.

Лабораторные установки укомплектованы современными измерительными приборами, которые не только обеспечивают учебный процесс, но и позволяют проводить научные исследования. В лаборатории постоянно проводятся работы по ее модернизации с целью расширения учебных и исследовательских возможностей. Последние разработки: стенд для исследования спектральных характеристик материалов в миллиметровом диапазоне длин волн; создание инструментальной базы и методик исследования нанодисперсного состава эмульсий и суспензий методом лазерно-корреляционной спектроскопии.

Студенты IV–VI курсов, аспиранты и молодые сотрудники под руководством ведущих ученых Института принимают участие в научной работе на оригинальных исследовательских установках в лабораториях.

К подготовке бакалавров, магистров и кандидатов наук привлечены практически все ведущие ученые ИСАН. В 2003-2008 г.г. в ИСАН проходили подготовку 41 аспирант и соискатель РАН, МФТИ, МИФИ. Организационно-методическое руководство и контроль за деятельностью аспирантуры осуществляет Ученый совет ИСАН.

В Институте работает совет по защите докторских и кандидатских диссертаций по специальностям 01.04.02 (теоретическая физика) и 01.0.4.05 (оптика). В его составе 20 докторов наук.

Более 20 % научных сотрудников Института являются молодыми людьми в возрасте до 35 лет. В Институте работает Совет молодых ученых. Председатель Совета является членом Ученого совета ИСАН.

В Институте ежегодно проводится конкурс научных работ молодых ученых в рамках конкурса научных работ ИСАН. Победители конкурса получают дипломы и денежные премии.

В Институте созданы условия для занятия спортом – теннисный корт, тренажерный зал.

Всем студентам и аспирантам, проходящим обучение в ИСАН, оказывается материальная поддержка – зачисление на полставки и доплата за участие в работах, выполняемых по российским и международным грантам.

Научная работа, общественная деятельность и повседневная жизнь молодых специалистов, аспирантов и студентов базовой кафедры представлена разделом на официальном сайте ИСАН.

НАУЧНО-ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ ОТДЕЛ

Отдел образован как самостоятельное подразделение в 1995 г., в него вошел аппарат ученого секретаря. Традиционно руководителем отдела является ученый секретарь, последние пять лет - к.ф.-м.н. Е.Б.Перминов. В настоящее время в отделе работают: референт дирекции В.М.Перкова, помощник ученого секретаря А.В.Летохова, секретарь директора М.В.Набока, сетевой администратор В.В.Пигульская, зав. канцелярией Г.Т.Шевченко, патентовед В.Н.Солянкина, работники участка множительной техники И.А.Яшин и Р.З.Нарышкина.

Основная задача отдела — организационное обеспечение научных исследований Института, в том числе:

- подготовка заседаний и ведение документации Ученого совета;
- подготовка планов научных работ Института и отчетов по выполненным работам;
- организация конкурсов научных работ;
- планирование международных связей Института и отчетность по ним, оформление выездных дел сотрудников, прием иностранных ученых и специалистов.

Отдел курирует работу научной библиотеки (заведующая - А.Н.Макарова и Е.А.Николаева).

Библиотека располагает фондом 63700 печ.ед., включающим в себя 10500 отечественных и иностранных книг по оптике и спектроскопии и некоторым смежным вопросам, 50000 периодических изданий (36 российских и 120 иностранных наименований журналов), а также фонд малотиражных изданий (диссертации, авторефераты, препринты и т.д.). В состав фонда частично вошли книжные собрания А.С.Боровика-Романова, Г.С.Ландсберга, Л.И.Мандельштама, С.Л.Мандельштама, Э.В.Шпольского, переданные их семьями.

В настоящее время библиотека получает 24 наименований российских и 21 иностранных научных журналов.

Библиотека имеет выход в Internet и четыре действующие базы данных для оперативного использования: "Current Contents", "Труды сотрудников Института спектроскопии РАН", "Книги по оптике и спектроскопии", "Сверхтвердые материалы".

Читателям предоставлен доступ к электронным библиотекам:

- Национальная электронная библиотека РФФИ,
- American Physical Society,
- Springer Link,
- Institute of Physics (IOP),
- Elsevier,
- IET Digital Library.

Также доступны реферативно-информационные ресурсы:

- Web of Science (с 1991 г. по настоящее время),
- ISI Science Citation Index,
- Springer Link e-books,
- Springer Link Reference Works.

В журнале «Оптика и спектроскопия» один раз в два года выпускалась библиография «Книги по оптике и спектроскопии» под редакцией к.ф.-м.н. В.Б.Белянина, которую готовила А.Н. Макарова.

При библиотеке создан Библиотечный совет в составе: к.ф.-м.н. Ю.Е.Лозовик – председатель, к.ф.-м.н. В.Г.Колошников, д.ф.-м.н. Е.А.Рябов, д.ф.-

м.н. А.Н.Рябцев, А.Н.Макарова, который регулярно обсуждает политику подписки и нужды библиотеки. В конце года на Ученом совете заслушивается отчет о работе библиотеки.

Множительный участок Института имеет современное копировальное оборудование и обеспечивает копирование материалов для библиотеки, научных сотрудников и различных служб в объеме 7-10 тыс. страниц копий в месяц.

Отдел также курирует работы по функционированию и модернизации единой компьютерной сети Института (Д.В.Серебряков). В настоящее время информационно-вычислительная сеть (ИВС) Института – крупная корпоративная сеть с подключением компьютеров разнообразной аппаратно-программной конфигурации. Сеть объединяет свыше 180 компьютеров и активно используется для научных исследований и управления институтом. Соединение с Internet обеспечивается через оптический кабель, связывающий Институт с Троицким научным центром. Сейчас скорость канала составляет 100 Мбит/сек. Сеть работает по некоммерческому трафику провайдера НИИЯФ МГУ. Сотрудники имеют удаленный доступ к электронной почте Института и Интернету.

Институт имеет свой сайт – www.isan.troitsk.ru.

Отдел проводит большую работу по художественному оформлению материалов для различных выставок, семинаров и конференций, которые проводятся в конференц-зале Института.

Конференц-зал (на 145 человек) имеет хорошую акустику, оснащен современной проекционной техникой - в нем регулярно проводятся общие собрания сотрудников, заседания Ученых советов, конференции по конкурсу научных работ, общеинститутские (руководитель семинара — В.Г.Колошников) и лабораторные семинары. Наличие большого фойе позволяет организовывать там выставки, размещать стендовые доклады, устраивать перерывы на чай и кофе во время больших заседаний.

ОПЫТНОЕ ПРОИЗВОДСТВО. ИНЖЕНЕРНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ СЛУЖБЫ ИНСТИТУТА



Опытное производство (ОП) (руководитель — Г.К.Зинченко) участвует в создании приборов и установок для научных лабораторий и относится к основным подразделениям Института. Перечень продукции ОП включает экспериментальные макеты и опытные образцы разнообразных спектральных исследовательских и аналитических приборов, элементы лазеров, вакуумные тракты, юстировочные механизмы, криогенные узлы, устройства позиционирования, электронные модули, оптические детали и узлы и т.д.

Структурно ОП состоит из двух цехов: механо-сборочного и оптического. Общая численность работающего в ОП персонала составляет 14 человека, включая два ИТР.

Механо-сборочный цех (рук. — В.Г.Голубева) имеет оборудование для изготовления заготовок деталей, токарные, фрезерные, расточные, шлифовальные и сверлильные станки для их обработки (около 20 единиц), газозлектросварочное оборудование, участок для проведения слесарно-сборочных работ и ремонтный участок. Общее число рабочих механо-сборочного цеха — 10 человек.

Оптический цех (рук. — Р.П.Сургутсков) включает участок изготовления и предварительной обработки заготовок (материал — стекло, кварц, кристаллы, полупроводники), участок полировки оптических деталей и участок контроля качества оптических деталей. В цехе работают двое рабочих.



Широко используются кооперативные связи с ОП других институтов для нанесения гальванических и лакокрасочных покрытий, термической обработки, производства радиомонтажных работ, для вакуумного нанесения диэлектрических покрытий и электрополировки (ОКБ Физического института, Центр физического приборостроения ИОФАН, Научно-технологический центр уникального

приборостроения РАН), изготовления печатных плат (ТРИНИТИ, НИЯФ МГУ) и производства других работ.

Опытное производство ИСАН в содружестве с научными лабораториями способно изготовить вполне современные автоматизированные экспериментальные установки и опытные образцы как для нужд лабораторий, так и по договорам для других организаций, что особенно важно в условиях жесткого дефицита бюджетных средств на поддержку и развитие экспериментальной базы Института.

Инженерные службы (рук. - зам. директора Е.И.Юлкин) обеспечивают бесперебойную подачу электроэнергии, воды, тепла в помещения Института, телефонную связь и обслуживание инженерных коммуникаций и сантехнического оборудования. Годовое потребление электроэнергии Институтом составляет примерно 0.6 млн. кВт-час.

В составе отдела главного инженера имеется криогенный участок, который снабжает научные лаборатории закупаемым жидким азотом и жидким гелием. Годовое потребление лабораториями жидкого азота составляет примерно 25 тонн, потребление жидкого гелия около 250 л/год.

Автохозяйство Института (рук. — Р.П.Сургутсков) насчитывает 7 единиц, включая 3 легковые и 1 грузовую машины, автобус, трактор, автопогрузчик. Число работающих в гараже водителей и автослесарей — 4 человека. Общая численность отдела главного инженера — 13 человек.

В Институте работает специализированная группа ремонта, поверки и проката измерительных приборов и вычислительной техники (рук. — В.Г.Филиппов, 3 человека) и небольшой отдел материально-технического снабжения (рук. — Р.П.Сургутсков, 3 человека). Хозяйственный отдел (рук. — Н.М.Акимова) включает в себя персонал, выполняющий работы по уборке территории и помещений (20 человека), и группу охраны из 10 человек.

В тесной связи с лабораториями, ОП, инженерными и хозяйственными службами работают группа охраны труда и экологической безопасности (Н.П.Виноградов) и группа предупреждения чрезвычайных ситуаций и противопожарной безопасности (Н.Г.Перец).

ПЛАНОВО-ФИНАНСОВАЯ СЛУЖБА

Планово-финансовая служба Института (руководитель – заместитель директора А.Ю.Плодухин, главный бухгалтер Л.П.Назарова) состоит из бухгалтерии и планово-экономического отдела и осуществляет планирование и организацию финансово-хозяйственной деятельности Института, бухгалтерский учет всех осуществляемых Институтом хозяйственных операций, контроль за движением имущества и выполнением финансовых обязательств. Все производимые бухгалтерские расчеты компьютеризированы.

С 1992 г. в Институте введен внутренний хозрасчет, по которому руководители отделов и самостоятельных лабораторий взяли на себя ответственность как за изыскание дополнительных к бюджетному финансированию средств за счет грантов, контрактов, договоров, так и за их рациональное использование, поскольку только не более 20 % от этих средств отчисляется на общеинститутские нужды.

Такой хозрасчет увеличил нагрузку на финансовую службу, но развязал инициативу отделов. Именно благодаря этому обстоятельству Институт смог успешно работать даже в периоды резкого уменьшения или нерегулярности поступления бюджетного финансирования.

ОТДЕЛ КАДРОВ

Много лет небольшой отдел кадров возглавляет ответственный, опытный, квалифицированный специалист Л.С.Васильева. Лидия Сергеевна выполняет работу, далеко выходящую за рамки должностных обязанностей. На ее глазах многие сотрудники Института выросли от студента до маститого ученого. В той доброжелательной и комфортной атмосфере, которая сохраняется внутри Института на протяжении многих лет, есть доля ее труда.



СОВЕТ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ

Совет молодых ученых (СМУ) ИСАН создан с целью объединения научной молодежи Института, формирования молодежной политики, координации работы и обучения молодых специалистов Института, защиты и представления интересов молодежи в профессиональной и социально-бытовой сферах, содействия подготовке кадров для академической науки, выполнению научных исследований, пропаганде новейших достижений академической науки.

Совет является постоянно действующим коллегиальным совещательным органом и представляет собой собрание молодых ученых ИСАН до 35 лет включительно. На начало 2008 г. штат института насчитывает 15 молодых специалистов (в т.ч. 7 – кандидаты наук), а также более 30 прикомандированных студентов и аспирантов МФТИ, МИФИ, МГУ, МПГУ и других научно-образовательных учреждений.

Основные направления деятельности Совета:

- выявление проблем молодых ученых и специалистов, поиск путей их решения;
- содействие профессиональному росту научной молодежи ИСАН, развитию молодежных научных инициатив и закреплению молодых научных кадров в Институте, поддержание научной преемственности;
- создание системы поддержки молодых ученых и специалистов (фонды, гранты, стипендии, командировки и т.п.);
- развитие межинститутских связей и международных контактов с молодежными, благотворительными организациями, университетами и т.п.;
- сбор, анализ и представление информации о вакансиях, грантах, конференциях, школах и иных мероприятиях по поддержке молодежи;
- организация и проведение научных конференций, курсов, тренингов, семинаров, циклов лекций, конкурсов молодых ученых;
- участие в проведении кадровой политики, учитывающей интересы молодежи;
- организация работы регулярного научного семинара молодых ученых ИСАН;
- сотрудничество с базовой кафедрой МФТИ «Квантовая оптика» и другими ВУЗами, работа с абитуриентами и студентами, прикомандированными к Институту;
- участие в организации культурно-массовых, спортивных и оздоровительных мероприятий.

Председатель СМУ – к.ф.-м.н. А.В.Наумов, секретарь – к.ф.-м.н. П.Н.Мелентьев, члены бюро: к.т.н. Е.В.Горский, Н.М.Коротков, к.ф.-м.н. А.В.Потапов.
Адрес веб-страницы СМУ ИСАН: www.isan.troitsk.ru/~young

ПЕРВИЧНАЯ ПРОФСОЮЗНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ

Основной целью Профсоюза РАН являются представительство и защита социально-трудовых, профессиональных прав и интересов членов Профсоюза РАН. В настоящее время первичная профсоюзная организация (ППО) Института насчитывает 146 человек. Высшим руководящим органом ППО является профсоюзная конференция. Постоянно действующим и исполнительным выборным коллегиальным органом является профсоюзный комитет (профком), председатель - Е.П.Чукалина. Профком осуществляет контроль за соблюдением трудового законодательства, за выполнением коллективного договора, за состоянием охраны труда, за соблюдением законодательства в области социального страхования и охраны здоровья. Председатель профкома участвует в работе Ученого совета института, входит в состав аттестационных комиссий, комиссии по разработке коллективного договора и комиссии по использованию фондов, формируемых за счет страховых взносов. Профком осуществляет заботу о своих членах: предоставляет им материальную помощь, поздравляет с праздниками и юбилеями. Стало уже традицией участие профкома в проведении новогодних вечеров.



Выставка детского рисунка

По инициативе профкома были проведены выставки детского рисунка к празднику 8 Марта и Дню Победы. Свои рисунки представили более 20 детей. Все участники выставки получили подарки.

Вот уже четыре года как председатель профкома, заручившись поддержкой активных членов профкома, организует

поездки в театры г. Москвы. В 15 поездках на различные постановки Государственных Академических Большого и Малого Театров, Театра Московская оперетта, театра Новая опера и Концертного зала им. П.Н.Чайковского приняли участие более 50 сотрудников Института и членов их семей. Также были организованы экскурсии в интересные исторические и архитектурные места Подмосквья — усадьбы Вороново и Дубровицы.



У церкви «Знамение» в Дубровицах

Забота о конкретных людях и здоровая атмосфера в коллективе Института являются главной задачей профкома. В ее реализации профком всегда находил поддержку и понимание со стороны администрации Института.

Дирекция Института спектроскопии РАН



Директор Е.А.Виноградов



О.Н.Компанец
Заместитель директора по
научной работе



Е.И.Юлкин
Заместитель директора по
общим вопросам



А.Ю.Плодухин
Заместитель директора по
экономике и финансам



Ученый секретарь
Е.Б.Перминов

О Г Л А В Л Е Н И Е

Стр.

4	ВВЕДЕНИЕ
12	ПРЕМИИ, МЕДАЛИ И ЗВАНИЯ СОТРУДНИКОВ ИНСТИТУТА
17	ОТДЕЛ АТОМНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ
17	Лаборатория атомной спектроскопии
25	Лаборатория спектроскопии плазмы
35	ОТДЕЛ ЛАЗЕРНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ
35	Лаборатория лазерной спектроскопии
59	Лаборатория спектроскопии возбужденных состояний молекул
68	Лаборатория спектроскопии ультрабыстрых процессов
92	ОТДЕЛ СПЕКТРОСКОПИИ ТВЕРДОГО ТЕЛА
93	Лаборатория спектроскопии конденсированных сред
101	Лаборатория спектроскопии полупроводниковых структур
114	Сектор Фурье-спектроскопии высокого разрешения
125	ОТДЕЛ ЛАЗЕРНО-СПЕКТРАЛЬНОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ
133	ОТДЕЛ МОЛЕКУЛЯРНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ
133	Лаборатория молекулярной спектроскопии высокого разрешения и аналитической спектроскопии
144	Сектор электронных спектров молекул
168	Сектор микроволновой спектроскопии
173	ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ОТДЕЛ
195	ЛАБОРАТОРИЯ СПЕКТРОСКОПИИ НАНОСТРУКТУР
238	ЛАБОРАТОРИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ МЕТОДОВ СПЕКТРОСКОПИИ И ИНТЕГРИРОВАННАЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ИСАН
240	НАУЧНО-ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ ОТДЕЛ
242	ОПЫТНОЕ ПРОИЗВОДСТВО
243	ПЛАНОВО-ФИНАНСОВАЯ СЛУЖБА
244	ОТДЕЛ КАДРОВ
244	СОВЕТ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ
245	ПЕРВИЧНАЯ ПРОФСОЮЗНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ
246	ДИРЕКЦИЯ ИНСТИТУТА СПЕКТРОСКОПИИ РАН

Институту спектроскопии РАН – 40 лет

Редактирование, компьютерная верстка, дизайн
А.В.Летохова