



**ИНСТИТУТ СПЕКТРОСКОПИИ  
Российская Академия Наук**

***35 лет***

Троицк  
2003

# **ИНСТИТУТ СПЕКТРОСКОПИИ Российской Академии наук**



**Троицк Московской обл.**

**2003**



**Директор Е.А.Виноградов**



**Зам. директора О.Н.Компанец**



**Зам.директора Е.И.Юлкин**



**Ученый секретарь О.А.Туманов**



**Ученый секретарь по приборостроению  
А.Ю.Плодухин**

## ВВЕДЕНИЕ

**29 ноября 1968 года Президиум АН СССР своим решением №863 постановил:** “В соответствии с решением Государственного комитета Совета Министров СССР по науке и технике №15 [пункт 4] от 26 марта 1968 года **организовать Институт спектроскопии АН СССР** на базе лаборатории Комиссии по спектроскопии в составе Отделения общей физики и астрономии АН СССР”.

Основные направления научных исследований Института были определены тем же Постановлением №863, но их конкретное содержание менялось с течением времени и сейчас они могут быть сформулированы следующим образом:

1. Спектроскопия атомов, ионов, молекул, кластеров, объема и поверхности конденсированных сред и разработка новых методов спектроскопии, оптика ближнего поля, нанооптика.

2. Лазерная спектроскопия с активным воздействием света на вещество и ее применение для разделения изотопов, охлаждения атомов, модификации окружения молекул в матрицах, в фотохимии, фотобиологии, аналитической химии и др. областях.

3. Аналитическая спектроскопия и ее применения в технологическом контроле, экологическом мониторинге, системах жизнеобеспечения человека, в изучении природных и техногенных катастроф и др. областях.

4. Разработка и создание уникальных приборов, спектральной аппаратуры, аналитических приборов, лазеров, систем регистрации, методик и метрики измерений для обеспечения главных направлений фундаментальных исследований и практических применений.

5. Подготовка научных кадров высшей квалификации.

Успехи Института, признанные в стране и за рубежом, созданы умением и талантом его сотрудников. Огромную роль в определении направлений исследований и в подборе кадров, представляющих различные научные традиции и школы, сыграл основатель Института и его директор в течение первых 20 лет член-корреспондент АН СССР Сергей Леонидович Мандельштам. Именно им были заложены принципы охвата всех основных направлений спектроскопии, сочетание экспериментальных и теоретических исследований как в фундаментальных, так и в прикладных направлениях, тесная связь с высшей школой и промышленностью в СССР, а также с ведущими научными центрами мира.

Институт ведет исследования спектров атомов, ионов с высокой кратностью ионизации, плазмы, молекул (как простейших в газовой фазе, так и сложных органических в различных матрицах), жидкостей, кристаллов и пленок, многослойных тонкопленочных структур, высокотемпературных сверхпроводников, поверхности твердых тел, биообъектов

Важным направлением работ Института с момента его организации является также приборно-методическое обеспечение фундаментальных исследований, основанное на использовании принципиально новых методов исследований для построения спектральной аппаратуры, а также использование лазеров, электронно-вычислительной техники и других средств для существенного повышения чувствительности, разрешающей способности, скорости и точности спектроскопических и аналитических исследований. Для получения спектров в Институте создан большой набор исследовательских спектральных приборов и установок, многие из которых являются уникальными и не имеющими аналогов в мире. Большинство создаваемых в Институте приборов и методик являются оригинальными и перспективными для применений в народном хозяйстве, обороне, медицине, экологии.

Область изучаемых спектров различных объектов простирается от рентгеновского до сантиметрового диапазона длин волн.

Среди них:

— спектрометры с высоким спектральным (до  $10^6 \text{ см}^{-1}$ ), временным (до  $3 \times 10^{-14} \text{ с}$ ) и пространственным (на атомно-молекулярном уровне) разрешением;

— методы и аппаратура для ультрачувствительного детектирования следов атомов (их изотопов) и молекул в газообразных, жидких и твердых образцах с пределом обнаружения вплоть до нескольких фемтограмм ( $10^{-15} \text{ г}$ ) в пробе);

— методы и аппаратура для исследования ультратонких пленок (вплоть до монослойных) на поверхности металлов и диэлектриков и для исследования физики поверхности твердых тел.

В Институте создан и активно работает Центр коллективного пользования "Опτικο-спектральные измерения", состоящий из двух секторов: сектора фурье-спектроскопии в составе отдела спектроскопии конденсированных сред, и сектора фемтоноптоики и спектроскопии в составе отдела лазерной спектроскопии.

Подавляющее большинство исследований в Институте ведется на переднем крае мировой науки. За 35 лет существования ИСАН его сотрудниками защищено более 100 кандидатских и около 40 докторских диссертаций. Список докторских диссертаций приведен в Приложении 1, поскольку их названия отражают основные направления работ Института.

С 1969 по 2002 год сотрудниками Института опубликовано более 4800 научных статей в реферируемых журналах, из них более трети в ведущих зарубежных журналах. Издано 38 монографий, многие из которых переведены на английский язык. Список монографий приведен в Приложении 2.

Краткий перечень основных достижений Института в области фундаментальных исследований содержится в последующих разделах, посвященных результатам деятельности научных структурных подразделений.

Сейчас в научной структуре Института находятся:

**отдел атомной спектроскопии** — 18 человек, заведующий 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** — 32 человек, заведующий 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 к.ф.-м.н. Ю.Г.Вайнер);

**отдел спектроскопии твердого тела** — 27 человек, заведующий отделом профессор Е.А.Виноградов. В составе отдела: лаборатория спектроскопии конденсированных сред (зав. лабораторией профессор Б.Н.Маврин), лаборатория спектроскопии полупроводниковых структур (зав. лабораторией профессор Е.А.Виноградов) и сектор фурье-спектроскопии центра коллективного пользования "Опτικο-спектральные измерения ИСАН" (руководитель профессор М.Н.Попова);

**отдел лазерной спектроскопии** — 31 человек, заведующий отделом профессор В.С.Летохов. В составе отдела: лаборатория лазерной спектроскопии (зав. лабораторией д.ф.-м.н. В.И.Балькин), 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 "Опτικο-спектральные измерения ИСАН" (руководитель к.ф.-м.н. Ю.А.Матвеец);

**отдел лазерно-спектрального приборостроения** — 18 человек, заведующий отделом д.ф.-м.н. О.Н.Компанец;

**теоретический отдел** — 11 человек, заведующий 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** — 10 человек, зав. лабораторией к.ф.-м.н. Ю.Е.Лозовик;

**лаборатория экспериментальных методов спектроскопии** – 2 человека, зав. лабораторией к.ф.-м.н. Е.Б.Перминов

Институт курирует работу Научного совета РАН по проблеме “Спектроскопия атомов и молекул” - старейшего Совета при Отделении физических наук РАН. Продолжительное время председателем Совета был основатель ИСАН чл.-корреспондент РАН Сергей Леонидович. Мандельштам. В настоящее время Совет возглавляет чл.-корреспондент РАН Игорь Ильич Собельман, заместитель председателя Совета – директор ИСАН профессор Евгений Андреевич Виноградов, ученый секретарь – в.н.с. ИСАН Людмила Алексеевна Бурева. Научный совет РАН по спектроскопии при всесторонней помощи со стороны ИСАН ведет активную научно-организационную работу. В частности, в 2001 г. состоялся XXII Съезд по спектроскопии – одно из важных мероприятий Совета. В декабре настоящего, юбилейного для ИСАН года, состоится XVII Конференция «Фундаментальная Атомная Спектроскопия».

В настоящее время в Институте спектроскопии РАН работает 256 человек, из них в научных лабораториях и научно-технических подразделениях научных сотрудников вместе с инженерами-физиками и аспирантами лабораторий — 160 человек, в том числе 30 докторов наук и 53 кандидата наук. В ОГИ и опытном производстве — 40 человек, в других вспомогательных службах — 40 человек. Административно-управленческий аппарат — 16 человек.

Основатель Института — член-корреспондент АН СССР Сергей Леонидович Мандельштам руководил Институтом до 1989 года. В настоящее время директором Института спектроскопии является д.ф.-м.н. профессор Е.А.Виноградов, заместителем директора по научной работе — д.ф.-м.н. О.Н.Компанец, ученым секретарем — к.ф.-м.н. О.А.Туманов, заместителем директора по общим вопросам — Е.И.Юлкин, ученым секретарем по приборостроению, научно-техническим и экономическим связям - А.Ю.Плодухин.

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), О.А.Туманов (ученый секретарь), В.М.Агранович, В.И.Балькин, В.Д.Бланк, Л.А.Бурева, Б.С.Думеш, Г.Н.Жижин, 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.Матвеец, М.Н.Попова, Е.А.Рябов, А.Н.Рябцев, Б.М.Харламов, 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).

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 талантливой молодежи.

В 2000 году Институту продлено действие лицензии, дающую право 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".

Имеется научно-техническая библиотека, одна из наиболее полных в России в части литературы по оптике и спектроскопии.

Признанием заслуг ученых ИСАНа служат высшие научные премии, присужденные за выполненные в Институте исследования. Премиями удостоены:

В.С.Летохов (совместно с В.П.Чеботаевым) — Ленинская премия за работы по нелинейной лазерной спектроскопии (1978 г.);

- 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 (1998 г.);

Алиев М.Р. <sup>3</sup>/<sub>4</sub> Премия АН СССР и Чехословацкой АН за цикл работ по теории колебательно-вращательных спектров нежестких молекул (1982 г.);

В.Г.Колошников и Ю.А.Курицын (совместно с сотрудниками ФИАНа и др. организациями) — Государственная премия СССР за работы по диодной лазерной спектроскопии высокого разрешения (1985 г.);

Е.И.Альшиц, Л.А.Быковская, Р.И.Персонов, Б.М.Харламов (совместно с учеными ИФ АН ЭССР и др.) — Государственная премия СССР за работы по селективному лазерному возбуждению люминесценции замороженных растворов (1986 г.);

А.А.Макаров, Ю.А.Горохов, А.А.Пурецкий, Е.А.Рябов, Н.П.Фурзиков — премия Ленинского комсомола за работы по лазерному разделению изотопов (1978 г.);

С.Л.Мандельштам — Государственная премия СССР за цикл работ по рентгеновскому излучению Солнца (1977 г.);

- премия АН СССР имени академика Д.С.Рожественского за работы по спектроскопии высокоионизованных атомов (1977 г.);

В.М.Агранович — премия им. Александра фон Гумбольдта (Германия, 1992 г.), премия им. П.Капицы (Англия, 1993) и премия имени академика Л.И.Мандельштама за теоретические исследования по спектроскопии поверхности (1997 г.);

Р.И.Персонов - Премия им. Александра фон Гумбольдта (Германия, 1995 г.)

В.С.Летохов, В.И.Балькин, В.Г.Миногин — премия РАН имени академика Д.С.Рожественского за цикл работ «Лазерное охлаждение и пленение атомов» (2001 г.).

Институт имеет тесные научные контакты и ведет совместные научные работы с ведущими научными центрами Англии, Германии, Дании, Италии, Испании, Франции, Финляндии, Швейцарии, Швеции, США, Канады, Китая, Кореи, Японии, Австралии и Индии, а также восточноевропейских государств.

В 2002 году Институт спектроскопии РАН (ИСАН) прошел очередную государственную перерегистрацию, имеет Свидетельство № 1794/94 Московской областной регистрационной палаты как государственное учреждение, а также Свидетельство № 4071 Министерства науки и технологий РФ о государственной аккредитации как научной организации, имеющей статус государственного учреждения.

## 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 и рентгеновских лазеров, а также разработка спектральной диагностики высокотемпературной плазмы. В отделе работает 20 сотрудников, из них 3 доктора и 8 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.

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  $85^\circ$ ) 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 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-микротонометр, 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 начало 2003 г. Каждая клеточка соответствует определенному иону; если спектр иона в той или иной мере исследовался — клеточка зеленая, если спектр неизвестен - клеточка белая. Красными 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 спутники 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  $Z=10-100$  (У.И.Сафронова, Э.Я.Кононов) [2].

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: Sb, Te, I и Bi [5]. В настоящее время решается задача поиска и исследования автоионизационных состояний в однократно ионизованных атомах тяжелых элементов. Эта информация крайне необходима для правильного описания динамики столкновительных процессов с участием таких ионов и последующей диагностики низкотемпературной плазмы. 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 астрофизики в связи с интерпретацией спектров химически особенных звезд, получаемых с помощью

Таблица изученности спектров ионов периодической системы (H-Mo)

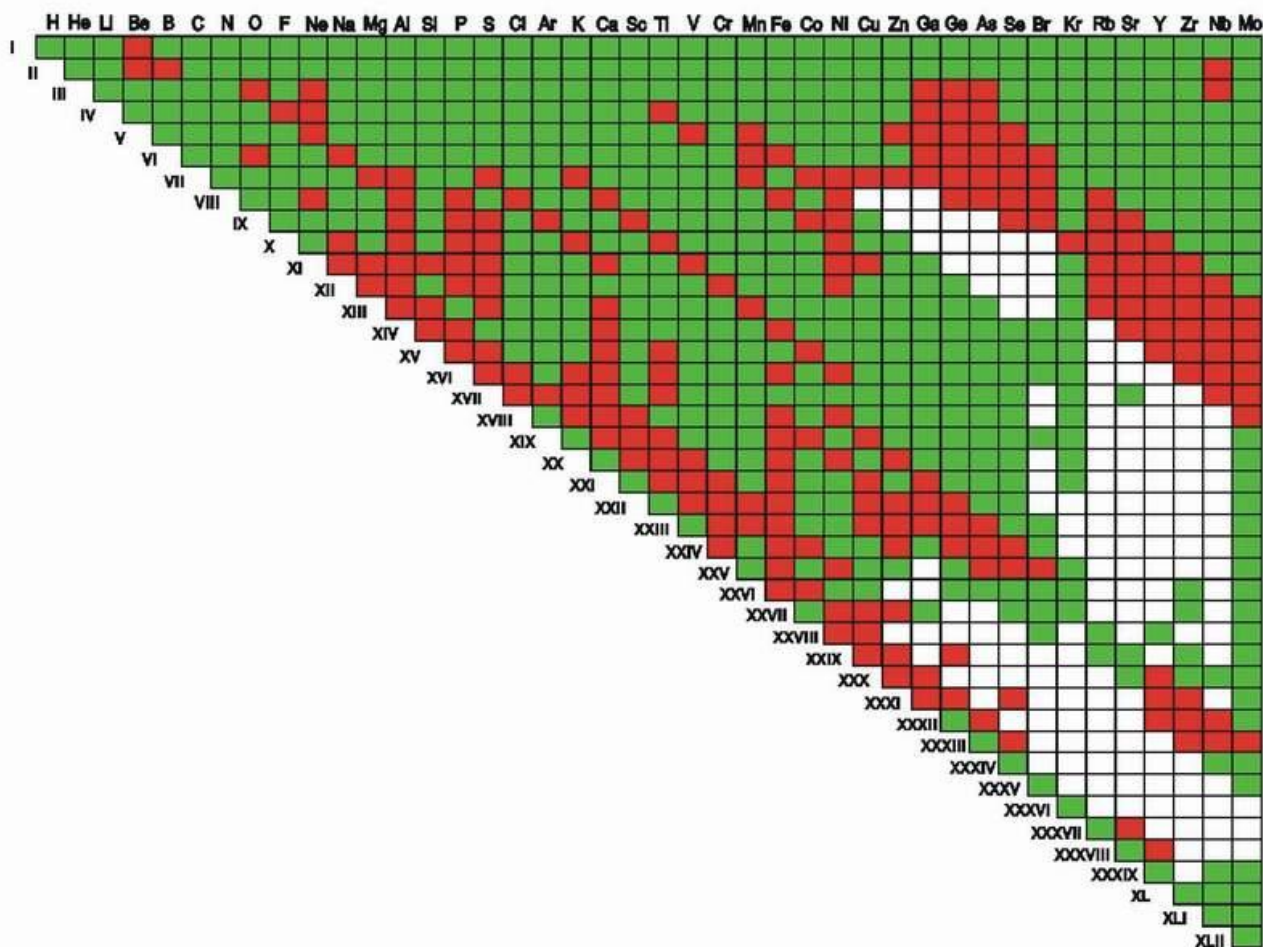
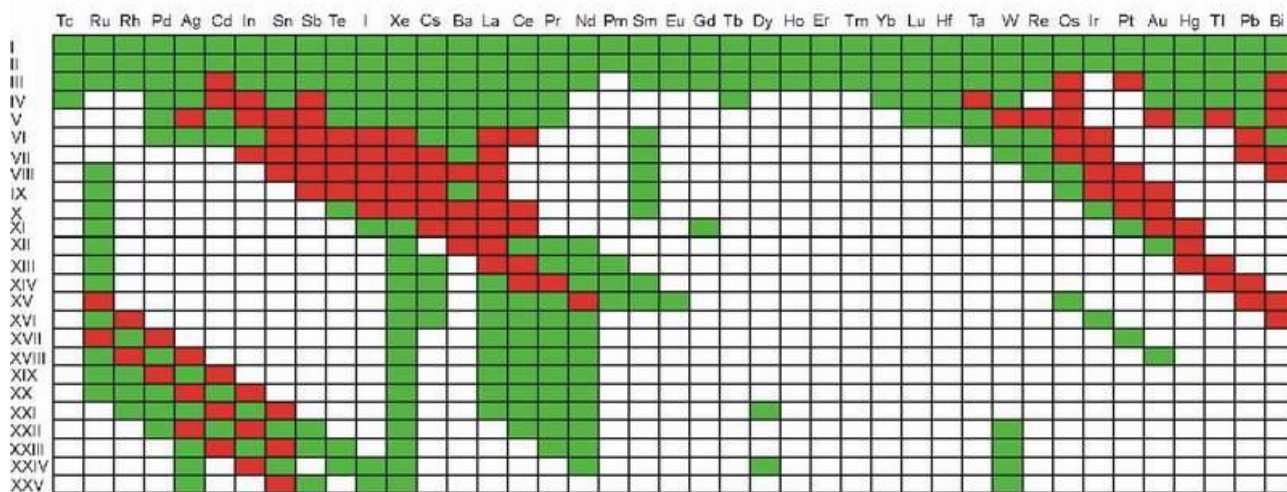


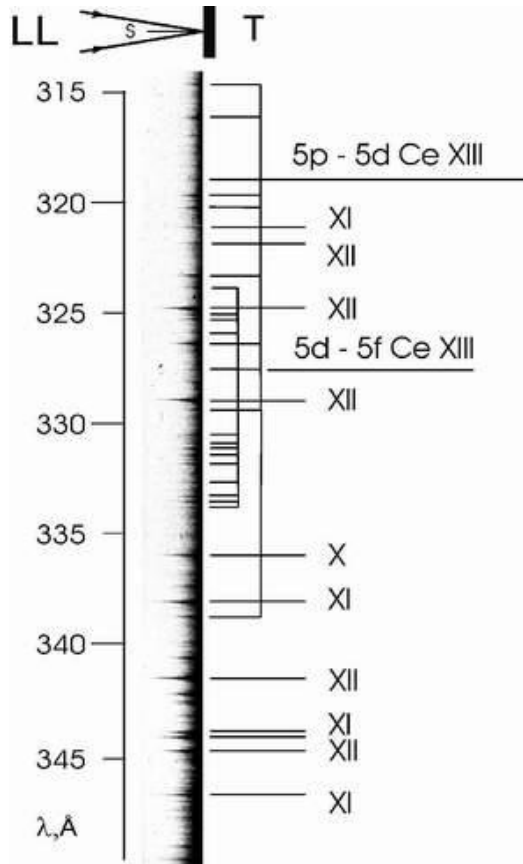
Таблица изученности спектров ионов периодической системы (Tc - Bi)



□ - спектр неизвестен    ■ (green) - спектр известен    ■ (red) - изучено в ИСАНе

Hubble Space Telescope, а также физики рентгеновских лазеров. За последние 5 лет в лаборатории решены две крупные спектроскопические проблемы в области спектроскопии

тяжелых ионов.



Спектр церия в области 31-35 нм, возбужденный в лазерной плазме (LL – лазерное излучение, S – положение входной щели спектрографа, T – цериевая мишень). Высокое разрешение позволяет надежно выделить линии палладиоподобного CeXIII от линии других ионов

В совместном (Университет г.Антигониш, Канада; Амстердамский университет, Нидерланды; Медонская обсерватория и Лаборатория им. Эме Коттон, Франция) проекте [6,7] 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 [8], а также параллельно развиваемому в Амстердамском университете новому методу расчета сложных атомных спектров на базе 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. [9] 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 переходы, на которых ожидается генерация в вакуумном ультрафиолете, в частности, найдена и точно измерена спектральная линия 41.8257 нм, на которой лазерная генерация в Xe IX уже наблюдается. Полученные атомные данные (уровни энергии, длины волн и вероятности переходов) являются базисом для достижения лазерной генерации на палладиоподобных ионах до ~24 нм.

Всего за 35 лет экспериментально изучены спектры около 260 ионов, идентифицировано более 28000 спектральных линий.

Создан банк библиографии по атомным спектрам и организован к нему свободный доступ через Интернет по адресу <http://das101.isan.troitsk.ru/> (А.Е.Крамида).

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 возмущений, оказалось существенным использование полевой формы теории возмущений, получившей заметное развитие в этих работах [10]. На развитие этих работ в последние

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, ридберговы 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.

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. 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.
7. Ryabtsev A.N. Spectroscopy of ions with 5d electrons in the ground state. - УФН, 1999, т.169, №.3, с.350-351.
8. 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.
9. 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.
10. Браун М.А., Гурчумелия А.Д., Сафронова У.И. Релятивистская теория атомов, М., Наука, 1984.

## Лаборатория спектроскопии плазмы



Основное направление исследований лаборатории (зав. лабораторией – К.Н.Кошелев) - ВУФ- и рентгеновская спектроскопия высокотемпературной плазмы электрических разрядов.

В течение последних 15 лет сотрудниками лаборатории и отдела атомной спектроскопии 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]. Такая 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 в сотрудничестве с А.А.Палкиным - ИАЭ) [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 Штутгартском Университете. Они сформировали экспериментальную базу для создания импульсных источников рентгеновского и нейтронного излучения с использованием разрядов типа «плазменный фокус» во многих лабораториях.

Для исследований сильно нестационарной и оптически плотной плазмы был разработан комплекс экспериментальных и теоретических методов спектральной диагностики. Совместно с институтом экспериментальной физики Рурского Университета (Бохум, Германия), была разработана программа «TRACE». Она предназначена для вычисления транспорта фотонов в плотной движущейся плазме методом Монте-Карло [6]. Были разработаны также и другие программы для анализа спектров многозарядных ионов.



Другим направлением исследований в лаборатории является изучение рентгеновских спектров ( $\lambda \leq 10 \text{ \AA}$ ) ионов с использованием электронного пучка для их получения и возбуждения (П.С.Анциферов). В рамках этой программы ведутся исследования рентгеновских характеристических линий (РХЛ), излучаемых свободными атомами. Основной целью экспериментов здесь является измерение 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. Экспериментальная техника, разработанная в лаборатории спектроскопии плазмы, основана на испарении металлов и создании внутриоболочечных вакансий с помощью импульсного электронного пучка ( $E=10 \text{ кэВ}$ ,  $I=0.02 \text{ А}$ , диаметр кроссовера  $0.3 \text{ мм}$  и временем импульса  $0.1 \text{ сек.}$ ). Одним из наиболее интересных результатов является появление спектральной структуры на крыльях РХЛ, которые имеют асимметричный профиль при излучении твердым телом [7].

В 1976 году 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 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 сделана в ИСАНе (Э.Я.Кононов, К.Н.Кошелев, С.С.Чурилов).

В настоящее время 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  $46.8 \text{ нм}$  был продемонстрирован в капиллярном разряде (Анциферов П., Дорохин Л., Назаренко А. и Кошелев К. Это было первое и, вероятно, единственное 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, Х-Й 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 двух последних лет в лаборатории исследуется новый подход - создание «стимулированных» нестабильностей в плазме капиллярного разряда (Анциферов, Дорохин, Назаренко).

В течение двух последних лет лаборатория работает над физическими аспектами создания мощных источников ВУФ излучения для литографии следующего поколения - ВУФ литографии. Требования промышленности к этому источнику, такие как средняя мощность порядка  $2000 \text{ Вт}$  в  $4\pi$  стерадиан в узком спектральном диапазоне ( $2\%$  около  $13.5 \text{ нм}$ ) и высокая частота повторения ( $10^4 \text{ Гц}$ ) превращают эту техническую проблему в тему глубокого физического исследования, включающего последние достижения технологии материалов и новые аспекты физики плазмы.

#### 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., Vihrev 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

## 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. В состав отдела 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". После скоростной 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 В.Г. Колошников) и двух секторов: Сектора электронных спектров молекул (зав. сектором к.ф.-м.н. Ю.Г. Вайнер) и Сектора микроволновой спектроскопии (зав. сектором д.ф.-м.н. Б.Н. Думеш). В отделе работают 32 сотрудника, из них 3 доктора и 10 кандидатов наук. Заведует отделом В.Г. Колошников. Отдел располагает разнообразными современными экспериментальными установками, в нем ведутся широкие экспериментальные и теоретические исследования по спектроскопии высокого разрешения молекул и твердых тел. Значительное внимание в отделе уделяется также практическим разработкам, связанным с применением результатов фундаментальных исследований для спектрального анализа и спектрального приборостроения.

### *Памяти Романа Ивановича Персонова*

*(4.01.1932 – 17.01.2002 гг.)*



Роман Иванович был одним из первых сотрудников нашего Института. Он пришел в Институт по приглашению С.Л. Мандельштама в 1969 г. До этого Р.И. Персонов работал и преподавал на физическом факультете Московского Государственного Педагогического института им. В.И. Ленина в лаборатории Э.В. Шпольского, крупного ученого, открывшего эффект возникновения квазилинейчатых спектров люминесценции и поглощения в специально подобранных n-парафиновых матрицах при низкой температуре. К моменту прихода в ИСАН Р.И. Персонов уже защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (1963 г.) и получил звание доцента (1964 г.). Тема его диссертационного исследования была связана с развитием и применением эффекта Шпольского. Работы, выполненные Р.И. Персоновым в те годы, были посвящены изучению спектров люминесценции и поглощения биологически важных соединений класса порфиринов, а также природе узких линий и мультиплетов, которые наблюдаются в

квазилинейчатых спектрах. В частности, было показано, что тонкоструктурные спектры представляют собой совокупность неоднородно уширенных бесфоновых линий. Еще в этот период своей работы Р.И. Персонова заинтересовали новые возможности, которые может дать применение лазеров в качестве источников возбуждения люминесценции растворов сложных органических соединений. Педагогическая деятельность Р.И. Персонова также развивалась успешно. Он читал курсы лекций по классической и квантовой механике, вел практические занятия со студентами по различным разделам курса теоретической физики, причем его лекции всегда отличались глубиной и ясностью изложения. Несомненные способности и перспективность молодого ученого, его научные и педагогические достижения привлекли внимание С.Л. Манделъштама, который в то время занимался поиском талантливых ученых, которые могли бы составить основной костяк создаваемого института.

После перехода Р.И. Персонова в Институт спектроскопии им и его сотрудниками были продолжены работы по исследованию природы узких линий и мультиплетов, которые наблюдаются в квазилинейчатых спектрах. В результате развития этих работ Р.И. Персоновым и коллегами было сделано два крупных открытия в спектроскопии примесного центра: открытие метода селективного возбуждения тонкоструктурных спектров (1972 г.) и метода выжигания стабильных спектральных провалов (1974 г.). Оба открытия быстро получили признание научной общественности у нас в стране и за рубежом и заложили основы нового направления – тонкоструктурной спектроскопии примесного центра в сложных примесных твердотельных системах. За рубежом эти методы получили названия: “Fluorescence Line Narrowing” и “Persistent Spectral Hole-Burning”. Они широко применяются при исследованиях сложных примесных молекулярных систем и позволяют получать самую разнообразную информацию о свойствах изучаемых систем. Итогом проделанных в этот период исследований стала докторская диссертация, которую Р.И. Персонов с блеском защитил в 1975 г.

Р.И. Персонов явился основателем Отдела молекулярной спектроскопии в нашем институте, которым он руководил вплоть до своей безвременной смерти. За эти годы в Отделе было выполнено много пионерских работ, результаты которых получили широкое признание у нас в стране и за рубежом.

Р.И. Персонов пользовался огромным уважением среди ученых нашей страны и зарубежных коллег. Он помог в становлении многих ученых и научных коллективов. Трудно даже перечислить то количество университетов и лабораторий, куда его приглашали для консультаций и совместной работы. Это большое количество университетов и лабораторий, как в России, так и за рубежом (Германия, США, Франция, Швейцария, Австрия, Тайвань и др.). Известный физик, один из основоположников спектроскопии одиночных молекул Мишель Оррит, так охарактеризовал в своей речи в память Р.И. Персонова, произнесенной на 8 Международной конференции "Hole Burning, Single Molecule, and Related Spectroscopies: Science and Applications (HBSM'03)", состоявшейся в г.Боземан (США, штат Монтана), его роль в становлении многих ученых: “Персонов - это гигант, на плечах которого мы выросли...”. Заслуги Р.И. Персонова в становлении селективной спектроскопии примесных молекулярных систем были отмечены присуждением ему Государственной Премии СССР (1985 г.) и Почетной премии им. А. Гумбольдта (Германия, 1995 г.).

Велики заслуги Р.И. Персонова в качестве преподавателя. В течение почти 30 лет профессор Персонов читал лекции по основам молекулярной спектроскопии на кафедре Квантовой оптики МФТИ. По признаниям слушателей Р.И. Персонов был блестящим лектором, умеющим очень четко и доходчиво излагать материал. Он всегда тщательно готовился к занятиям, доводя каждую лекцию до совершенства. Высокий профессионализм Р.И. Персонова как преподавателя был признан и за рубежом. Он был приглашен и читал курсы лекций по молекулярной спектроскопии и методам селективной лазерной спектроскопии сложных молекулярных систем в ряде зарубежных университетов и научных институтов. Это Калифорнийский университет в Риверсайде (США), Институт атомной и

молекулярной науки на Тайване, Байройтский университет (Германия), Венский университет (Австрия) и др. Свои знания и опыт Р.И. Персонов щедро передавал аспирантам и молодым сотрудникам лаборатории. Многие из успешно работающих ныне научных сотрудников института и ученых, работающих за рубежом, считают Романа Ивановича своим учителем.

Роман Иванович был удивительно гармоничной личностью. Талант большого ученого в нем сочетался с талантом большого цельного человека. Он был неизменно вежлив, отзывчив и доброжелателен при общении со всеми. В Институте не было ни одного человека, который был бы в натянутых отношениях с Романом Ивановичем. Можно смело утверждать, что Р.И. Персонов был одним из тех, безусловно авторитетных сотрудников, которые закладывали в Институте с самых первых лет его существования основы человеческих и профессиональных отношений. Эти основы оказались столь прочны, что даже в период бурных перемен 90-х годов в ИСАНе сохранился климат взаимного уважения, поддержки и умения радоваться успехам коллег.

Мы помним Романа Ивановича Персонова как доброго, глубоко порядочного и интеллигентного человека, чуткого к окружающим, умеющего сопереживать и понимать чужие проблемы, галантного мужчину и внимательного собеседника. Нам всем очень не хватает его.

## **Лаборатория молекулярной спектроскопии высокого разрешения и аналитической спектроскопии**



Лаборатория была организована в 1989 г. Зав. лабораторией — к.ф.-м.н. В.Г. Колошников. В состав лаборатории вошли группы лазерного атомно- флуоресцентного анализа (д.ф.-м.н. М.А. Большов), диодной лазерной спектроскопии (к.ф.-м.н. Ю.А. Курицын) и спектрального анализа металлов и сплавов (к.т.н. А.М. Лившиц), входившие ранее в состав существовавшей в Институте с момента его основания лаборатории приборостроения, переименованной в 1981 г. в лабораторию аналитической спектроскопии (зав. лабораторией В.Г. Колошников). До 2003 г. в состав лаборатории входила группа микроволновой спектроскопии (д.ф.-м.н. Б.С. Думеш).

Основным направлением работ лаборатории является создание новых методов и приборов для спектрального анализа и молекулярной спектроскопии высокого разрешения и применение этих методов для решения конкретных научных и практических задач.

В настоящее время в лаборатории работают 17 сотрудников (в том числе 2 доктор и 7 кандидатов наук).

### ***Лазерная атомно-флуоресцентная спектрометрия***



Начиная с 1972 г., в лаборатории проводились исследования по лазерной атомно-флуоресцентной спектрометрии (ЛАФС) (М.А. Большов (на фото), к.ф.-м.н. А.В. Зыбин, В.Г. Колошников, проф. С.Л. Мандельштам) [1]. Результатом систематических исследований теоретических основ метода ЛАФС и его экспериментальной реализации стало создание в Институте совместно с лабораторией лазерно-спектрального приборостроения (зав. лабораторией д.ф.-м.н. О.Н. Компанец) уникального

автоматизированного спектрометра ЛАФАС-1 [2], на котором были достигнуты рекордные для прямых экспрессных методов анализа пределы обнаружения металлов вплоть до  $10^{-10-11}\%$  (по массовой концентрации) или несколько фемтограмм определяемого элемента. С помощью этого прибора был выполнен, в частности, цикл исследований по определению содержания тяжелых металлов во льдах и снегах Арктики и Антарктики (М.А. Большов, к.ф.-м.н. С.Н. Руднев совместно с Лабораторией гляциологии и геофизики Гренобльского университета, Франция, проф. К. Бутрон). 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 анализа, гарантирующие отсутствие неконтролируемых загрязнений образцов в процессе работы. 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). 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). Анализ всех этих образцов позволил получить данные как о степени загрязнения Антарктиды тяжелыми металлами в далекие доисторические эпохи так и о глобальном загрязнении планеты, связанном с антропогенной деятельностью [3-6].

### 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.

### Диодная лазерная аналитика.

В последние годы совместно с Институтом спектроскопии и прикладной спектроскопии (ИСАС, г. Дортмунд, Германия) ведутся работы по использованию диодных лазеров (ДЛ) видимого и ближнего ИК диапазона в атомно-абсорбционном анализе (ДЛ-ААС) [1]. 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) [2]. К достоинствам метода следует также отнести и то, что он позволяет точно измерять

поглощение 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  $3 \times 10^{-8}$  до 2,3. (В.В. Лигер, А.В. Зыбин, Ю.А. Курицын) [3].

В совместных работах с группой в ИСАС (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 [4].

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 [5, 6].

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 экстремума сложного спектра поглощения определенного «реперного» компонента среды. Подбором параметров ДЛ можно минимизировать уровень исходного «фонового» 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, рН, состав смеси и т.п.). Такая методика позволяет количественно измерять изменения таких параметров среды. Этот вариант метода дифференциального поглощения был успешно испытан на примере создания дистанционного бесконтактного датчика температуры для капиллярного изотохофореза (В. Кривцун, Б. Грасс, Р. Хергенрёдер, М. Большов, К. Нимакс, А. Зыбин) [7] и для диагностики функционального состояния биоткани (В. Лигер, А. Зыбин, М. Большов, К. Нимакс) [8]. Последняя работа открывает путь к созданию на базе ДЛ методики ранней диагностики рака молочной железы.

## Литература

- 1 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.
- 2 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
- 3 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
- 4 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.
- 5 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
- 6 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.



7 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.

8 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.

### **Спектральный анализ металлов и сплавов.**

В середине восьмидесятых годов в лаборатории приборостроения по инициативе С.Л. Мандельштама были начаты исследования в области эмиссионного спектрального анализа металлов и сплавов. Основная цель работ состояла в создании на базе многоэлементных твердотельных приемников излучения малогабаритных спектрометров, предназначенных для сортировки сплавов. Использование таких приемников позволило разработать методы анализа и создать автоматизированные спектрометры, способные надежно работать при значительных изменениях условий окружающей среды, что обеспечивает возможность их использования непосредственно в цехах заводов и в складских помещениях.

За прошедшие годы был разработан (А.М. Лившиц, А.В. Пелезнев) ряд приборов для экспресс-анализа металлических сплавов, начиная с автоматизированного анализатора сплавов АСА-2 до параллельно-последовательного универсального анализатора сплавов типа ПАПУАС. На базе этой разработки в настоящее время производится малыми сериями аппаратура для контроля за составом как цветных, так и черных металлов [1, 2]. Анализаторы типа ПАПУАС позволяют определять большинство химических элементов в различных типах металлических сплавов в диапазоне концентраций от сотых долей до десятков процентов. Набор определяемых элементов определяется по желанию потребителя. Эти приборы в настоящее время успешно работают на ряде предприятий России.

### **Литература**

1. Лившиц А.М., Пелезнев А.В. Особенности применения приборов с зарядовой связью в эмиссионном спектральном анализе. Заводская лаборатория, 1992, №8, сс. 23-26
2. Лившиц А.М., Пелезнев А.В. Малогабаритный переносной сортировщик металлических сплавов «ПАПУАС-3». Оптическая техника, 1995, №1, сс. 34-35

### **Сектор электронных спектров молекул**



Сектор электронных спектров молекул (заведующий – 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, который позднее был преобразован в лабораторию. С момента основания и до момента смерти в 2002 г. сектор и лабораторию возглавлял проф. 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 электронных спектров молекул работают 11 сотрудников (из них 1 доктор наук и 4 кандидата наук). В секторе обучаются также 2 аспиранта и проходят преддипломную практику 4 студента 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 системах 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 этих экспериментах было обнаружено, что при достаточно низких температурах уширение таких спектров неоднородно, в них скрыто большое число узких бесфононных линий. Было показано, что тонкая структура в указанных спектрах может быть выявлена с помощью селективного лазерного возбуждения (Р.И. Персонов, Е.И. Альшиц, Л.А. Быковская [1,2,3]). Разработанный метод стал широко использоваться для получения тонкоструктурных спектров и получил в зарубежной литературе название: Fluorescence Line Narrowing. В ходе указанных экспериментов было также обнаружено, что при селективном лазерном облучении примесные центры могут испытывать разнообразные фотохимические и фотофизические превращения, приводящие к изменениям спектров фототрансформированных молекул. На изучении этих изменений основывается другой метод селективной спектроскопии, открытый в лаборатории в 1974 г. - метод выжигания узких стабильных спектральных провалов (ВП) в полосах поглощения. Этот метод был открыт также независимо и одновременно в Институте физики Эстонии и получил название Persistent Hole-Burning [4].

В настоящее время исследования, проводимые в секторе, можно условно разделить на два тесно связанных направления. Первое связано с дальнейшим совершенствованием развитых в лаборатории методов ВП и селективного возбуждения тонкоструктурных спектров флуоресценции и их использованием для исследований процессов спектральной диффузии в неупорядоченных твердотельных средах (д.ф.-м.н. Б.Н. Харламов, Н.И. Улицкий, В.Н. Крашенинников, А.А. Горшелев); второе – с развитием и применением новых методов исследования процессов спектральной релаксации в примесных аморфных системах (к.ф.-м.н. Ю.Г. Вайнер, к.ф.-м.н. М.А. Кольченко, к.ф.-м.н. А.В. Наумов). Деятельность по второму направлению началась 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 быстрых динамических процессов в примесных молекулярных системах. С 2000 г. для таких исследований стал применяться метод спектроскопии одиночных молекул, который был усовершенствован для указанной цели (Ю.Г. Вайнер, 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 селективных 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).

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

### ***Спектроскопия выжигания стабильных провалов***

*(Б.М. Харламов, Н.И. Улицкий, В.Н. Крашенинников, Е.П. Снегирев, А.А. Горшелев)*

Метод выжигания стабильных провалов стал мощным инструментом исследования процессов спектральной релаксации в примесных твердых телах и успешно используется во многих исследовательских коллективах. В секторе продолжают исследования по спектральной динамике органических полимеров и стекол с применением этого метода. Комбинация результатов, полученных методом ВП и методом фотонного эха, дает важную информацию об исследуемых процессах в уникальном временном диапазоне от  $10^{-11}$  с до, как минимум,  $10^6$  с. В последние годы получены уникальные результаты по исследованию релаксаций в органических полимерах при сверхнизких температурах в шкале времен от  $10^{-5}$  с до  $10^6$  с [0,2,3] с применением метода ВП. Проведены экспериментальные



Один из первых сотрудников сектора Б.М. Харламов и самый молодой сотрудник сектора А.А. Горшелев. (8-ая Межд. конф. HBSM-2001, Тайбей, Тавань).

исследования неравновесной спектральной диффузии [4], выполнены уникальные исследования неравновесной спектральной диффузии, индуцированной внешним электрическим полем [5,6], обнаружен и интерпретирован эффект светоиндуцированной спектральной диффузии [7]. Результаты этих исследований обобщены в [8]. 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.

Одним из последних открытий в области спектроскопии провалов является обнаружение их существенно нелоренцевой формы в аморфных

матрицах [11]. Провалы имеют весьма характерный профиль с более острой вершиной и медленнее спадающими крыльями, чем контур Лоренца. Проведен детальный теоретический анализ механизмов взаимодействия примесь-матрица и роли дисперсии параметров этого взаимодействия в формировании контура спектральных провалов [12]. Полученные результаты открывают богатые возможности исследования механизмов взаимодействия примесь-матрица в стеклах и дисперсии параметров этого взаимодействия на основе прецизионных измерений контуров спектральных линий.

Продолжаются работы по исследованию кинетики фотореакций, ответственных за механизм ВП. В частности, разработан метод измерения кинетики ВП, исключаяющий влияние неоднородного уширения [13]. Этот метод обеспечивает надежное измерение таких

факторов, как дисперсия эффективности фотореакции, обнаружение множественных каналов фотореакции и т.д.

Дальнейшие исследования динамики стекол имеют целью определение границ применимости модели ДУС в различных стеклах, детальное исследование “неДУСовских” релаксаций и соотнесение релаксационных характеристик с физико-химической структурой стекол, построение новой модели, описывающей свойства стекол, как при низких температурах, так и вблизи температуры стеклования.

Одной из популярных методик изучения примесных аморфных систем являются *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 *H<sub>2</sub>-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 изучался эффект “выхода” атома металла из плоскости молекул [16,17]. В последнее время продолжены 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.

### Литература

1. Maler 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. Gorshelev 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., Ходькин 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).

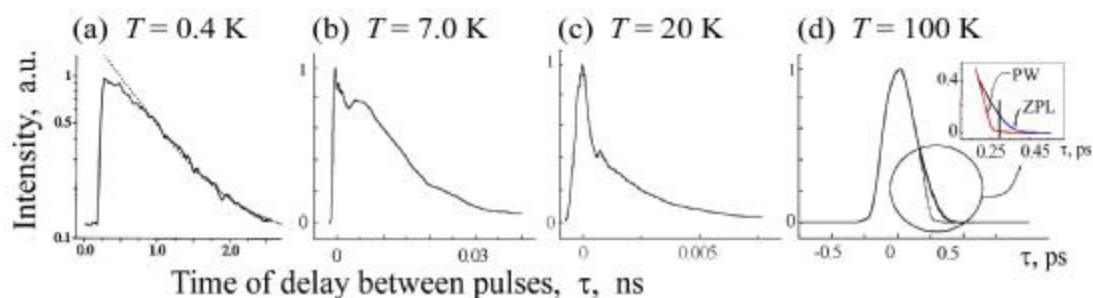
17. Улицкий Н.И., Снегирев Е.П., Персонов Р.И. Эффект Штарка на провалах в спектрах поглощения фталоцианина и его комплекса с алюминием в полимерных матрицах. Оптика и спектроскопия, 92 (6), 931 (2002).

### Фотонное эхо

(Ю.Г. Вайнер, М.А. Кольченко, А.В. Наумов)

Исследования по спектроскопии примесных неупорядоченных твердотельных систем методом фотонного эха (ФЭ) были начаты в лаборатории электронных спектров в 1990 году. Эти исследования 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 ФЭ (НФЭ) и создания экспериментальной установки. 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)) наносекундной спектральной диффузии [1-3], важному для понимания природы элементарных низкочастотных возбуждений в стеклах экспериментальному факту. В настоящее время проводятся систематические экспериментальные и теоретические исследования по динамике примесных стекол с использованием двух разновидностей техники ФЭ: НФЭ с широкополосным лазерным источником и двухимпульсного пикосекундного ФЭ (2ФЭ).

Существенным преимуществом метода НФЭ является возможность реализации высокого временного разрешения, что делает возможным исследование ультрабыстрых релаксационных процессов в примесных стеклах. Высокое временное разрешение установки (25 - 30 фс) позволяет, в частности, надежно разделять участки кривых спада ФЭ, соответствующие бесфононной линии и фононному крылу (см. Рис. 1) и проводить таким образом измерения времени оптической дефазировки  $T_2$  вплоть до температуры 100 К и выше.

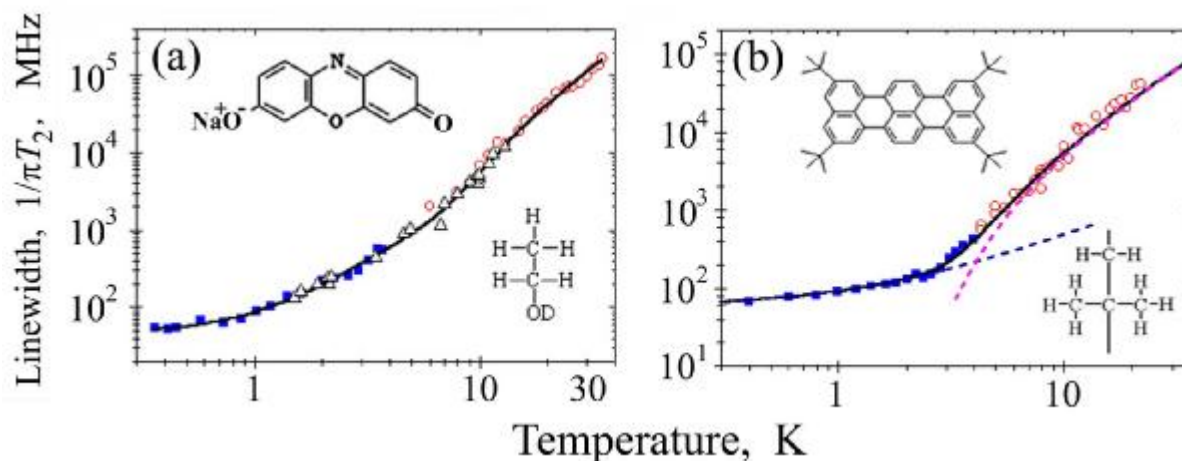


**Рис. 1.** Кривые спада двухимпульсного пикосекундного фотонного эха (a) и некогерентного фотонного эха (b-d) для системы *цинк-октаэтилпорфин* в *толуоле*. Пунктирная линия на (a) соответствует аппроксимирующей экспоненциальной зависимости, используемой для определения времени оптической дефазировки,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

Сотрудничество с исследователями Байройтского университета (D. Haarer, S. Zilker), экспериментальная установка 2ФЭ которых оснащена оптическим криостатом на He-3, дало возможность впервые провести уникальные измерения процессов оптической дефазировки в примесных стеклах в широком диапазоне температур (от 0,35 К до 100 К) и получить уникальную информацию о релаксационных процессах в стеклах в широком температурном



диапазоне [4-10] (см. Рис. 2). Эти измерения позволили 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 [3-11]. В ходе этих измерений был впервые обнаружен эффект дисперсии времен оптической дефазировки  $T_2$  в примесной аморфной системе: *тетра-tert-бутилтеррилен* в *полиизобутилене* [7,12]. Анализ зависимости времен  $T_2$  от температуры в изучаемых системах обнаружил отличие низкотемпературной части этой зависимости от предсказаний теории ФЭ в низкотемпературных стеклах.



**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 [М. 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) [13,14]. 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) [15,16]. 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.

### 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).

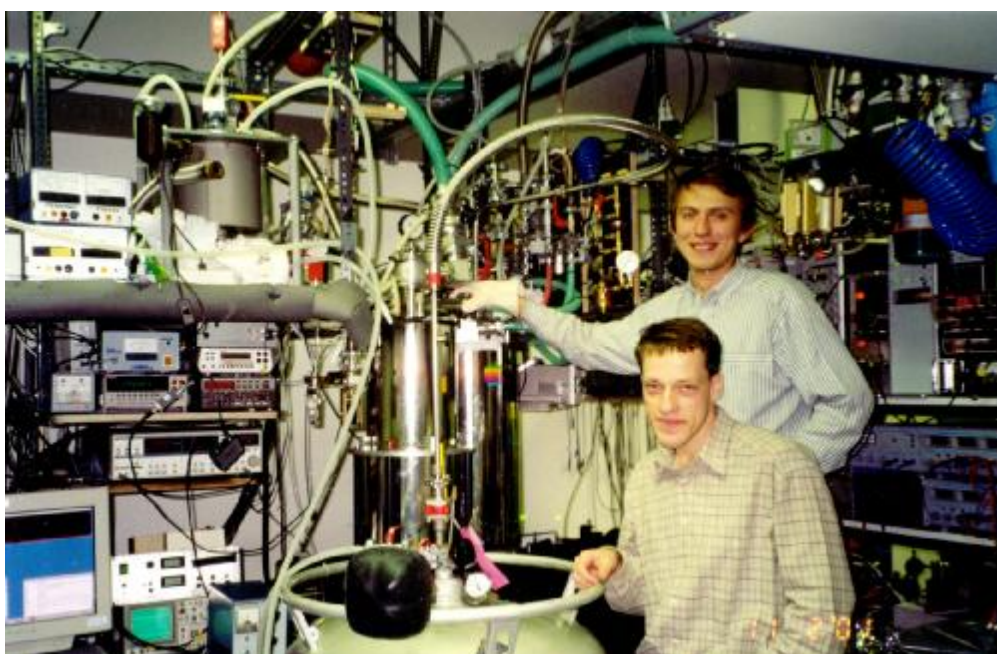


4. Zilker S.J., Vainer Yu.G., Haarer D. Line broadening mechanisms in spectra of organic amorphous solids: photon echo study of terylene in polyisobutylene at subkelvin temperatures. *Chem. Phys. Lett.*, 273, 232 (1997).
5. Zilker S.J., Friebel J., Haarer D., Vainer Yu.G., Personov R.I. Investigation 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). [In English: Vainer Yu.G., Kol'chenko M.A., Naumov A.V., Personov R.I., Zilker S.J. Optical dephasing in solid toluene activated by zink-octaethylporphine. *Solid State Phys.*, 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. A*, 291, 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). [Vainer Yu.G., Personov R.I. Photon echo in amorphous media under conditions of significant dispersion of homogeneous linewidths of impurity centers. *Optics and Spectroscopy*, 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). [In English: Vainer Yu.G., Kol'chenko M.A., Personov R.I. Soft-potential model and homogeneous width of spectral lines of impurity centers in molecular amorphous media. *Zh. Exp. Teor. Fiz.*, 119 (4), 738 (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).

## *Спектроскопия одиночных хромофорных молекул, внедренных в неупорядоченную органическую матрицу*

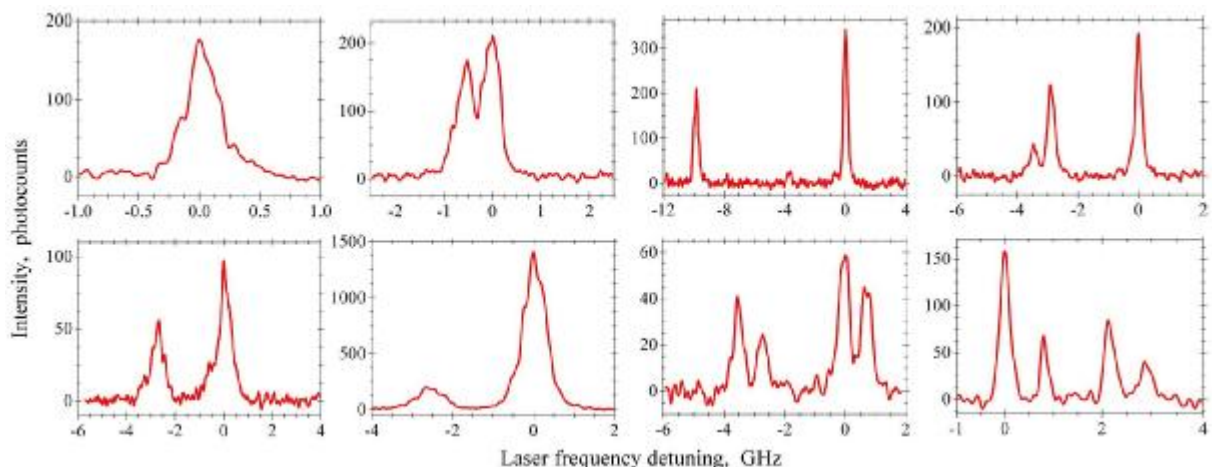
*(Ю.Г. Вайнер, А.В. Наумов)*

Это направление исследований стало развиваться сотрудниками сектора электронных спектров молекул сравнительно недавно - с конца 2000 г. – и в настоящее время является одним из основных направлений в деятельности сектора (см., напр., [0,2]). 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 позволили получить первое прямое доказательство того, что ДУСы реально существуют в неупорядоченных средах и вызывают прыжки спектральных линий примесных молекул.



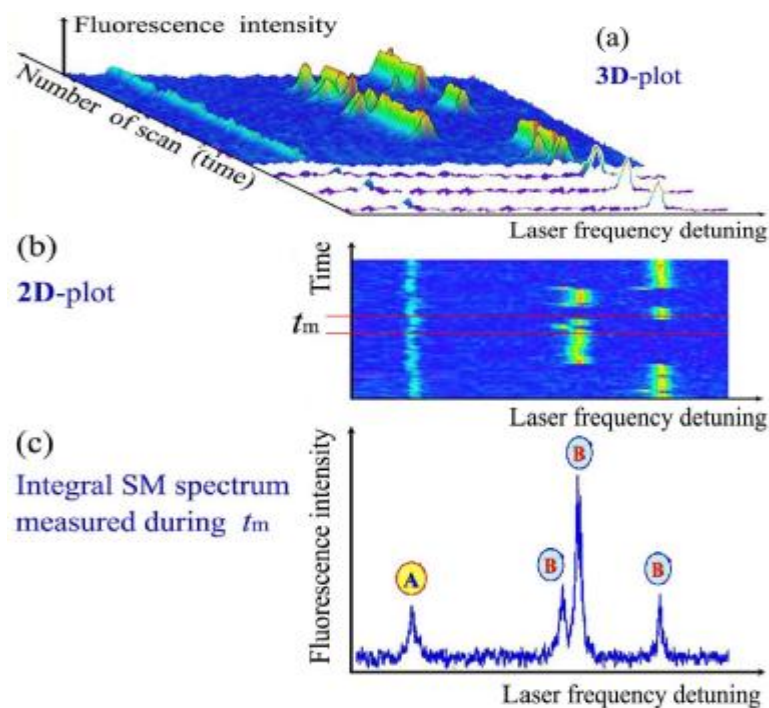
Установка для измерения спектров одиночных молекул. (На переднем плане Маркус Бауэр - аспирант кафедры «Экспериментальная физика IV» Байройтского университета, Германия; на заднем плане А.В. Наумов - сотрудник сектора электронных спектров молекул ИСАН).

Особенностью спектров одиночных примесных молекул (ОМ) в низкотемпературных неупорядоченных твердотельных матрицах является их сложная структура и изменение параметров со временем [0,2]. Это связано со случайным характером локальной динамики неупорядоченных сред. Резко выраженная индивидуальность и случайный характер таких спектров наглядно демонстрирует Рис. 1. На нем представлен ряд зарегистрированных спектров ОМ *тетра-tertбутилтеррилена*, внедренных в чисто аморфный *полиизобутилен*. 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?



**Рис. 1.** Примеры спектров одиночных примесных молекул *тетра-tertбутилтеррилена* в *полиизобутилене*, измеренных при температуре 2 К (суммарное время накопления сигналов 120 с).

В секторе развит новый подход к использованию метода СОМ для исследований динамики низкотемпературных стекол, который позволил преодолеть указанные проблемы [3,4] и тем самым открыть возможности для широкого применения метода СОМ при исследованиях примесных аморфных систем.

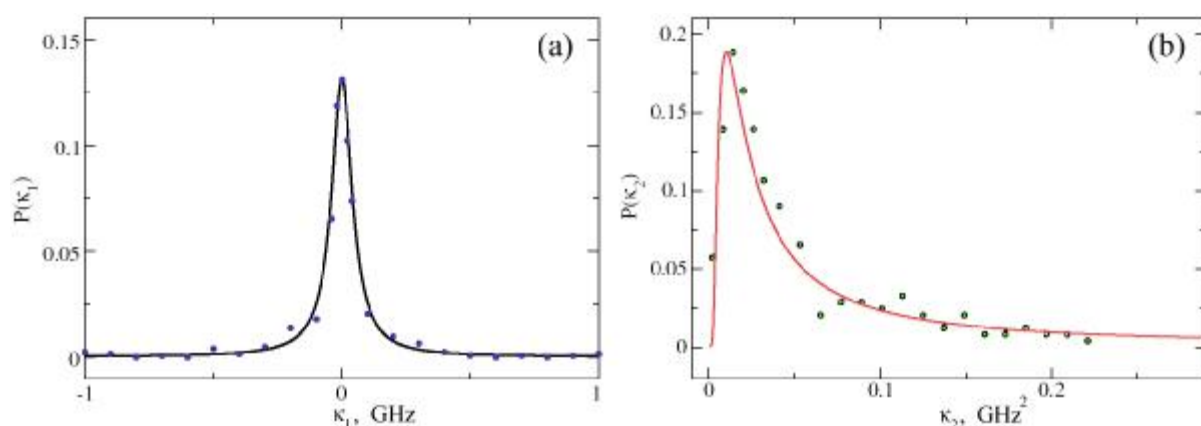


**Рис. 2.** Пример временной эволюции спектров одиночных молекул *тетра-tertбутилтеррилена* в *полиизобутилене* регистрируемых многократно при  $T = 2$  К (a,b). Результаты измерений представлены в виде трехмерной (3D-plot) и двухмерной (2D-plot) картинок, (a) и (b), соответственно. Цветовая гамма точек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

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 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 эту 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 последующем анализе временного поведения зарегистрированных спектров. Суть этой методики продемонстрирована на Рис. 2 [3,4].

Для адекватного описания сложных контуров спектров ОМ было предложено использовать хорошо известную концепцию моментов распределений [3,4]. 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 (Е. Barkai, R. Silbey, Кэмбридж, США) было показано теоретически и продемонстрировано экспериментально, что такие спектры подчиняются статистике Леви (обобщенной статистике Гаусса) [5]. Этот факт наглядно демонстрирует Рис. 3, на котором представлены распределения первых и вторых кумулянтов измеренных спектров в сравнении с аппроксимирующими их распределениями, рассчитанными на основе статистики Леви.

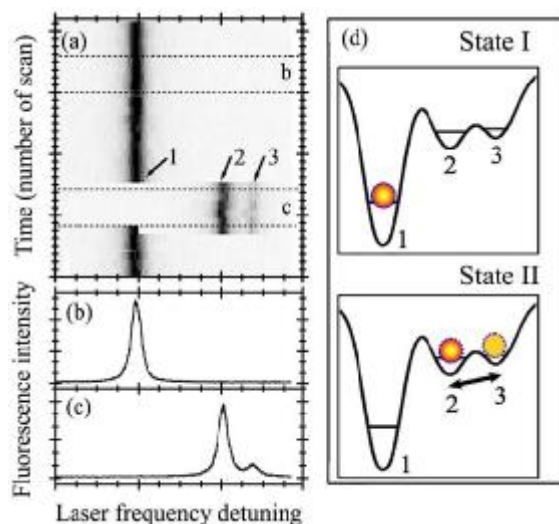


**Рис. 3.** Распределения первых (а) и вторых (б) кумулянтов спектров одиночных молекул *тетра-tert-бутилтеррилена*, внедренных в матрицу из *полиизобутилена*, рассчитанных по результатам измерений при  $T = 2$  К (точки) и их аппроксимация функциями (сплошные линии), которые представляют собой частные случаи обобщенной статистики Леви: функции Лоренца (а) и Смирнова (б).

С использованием развитого подхода совместно с сотрудниками Кафедры экспериментальной физики IV Байройтского университета (L. Kador, M. Bauer,



Байройт, Германия) был проведен цикл исследований по изучению низкотемпературной динамики примесных аморфных сред на примере системы: *тетра-tert-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 [3,4]; впервые на микроуровне разделены вклады туннелирующих ДУС и квазилокальных низкочастотных колебательных возбуждений матрицы в процессы уширения спектральных линий примесных центров [7].



**Рис. 4.** (a) 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 (a) пунктирными линиями. (d) Схема трехуровневой системы, «сильное взаимодействие» хромофора с которой позволяет объяснить временную эволюцию спектра ОМ.

В самое последнее время сотрудниками сектора, совместно с сотрудниками Кафедры экспериментальной физики IV Байройтского университета (L. Kador, M. Bauer) стали проводиться эксперименты, имеющие несколько иное направление - получение информации о механизмах взаимодействия элементарных низкочастотных возбуждений с примесными молекулами в неупорядоченных примесных системах из анализа временного поведения индивидуальных спектров ОМ. Такой анализ позволил, например, впервые выявить примеры временного [0] и температурного [8] поведения спектров ОМ, которые не укладываются в рамки современных представлений о природе низкотемпературных стекол. В частности, результаты некоторых наблюдений могут быть интерпретированы как результат взаимодействия примесной молекулы с «трехуровневыми» системами (Рис. 4), 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.

### Литература

1. 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). [In English: Vainer Yu.G., Naumov A.V., Bauer M., Kador L.. Dynamics of amorphous polymers at low temperatures and temporal

evolution of spectra of single impurity molecules: I. Experiment. Optics and Spectroscopy, 94, 864 (2003).].

2. 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). [In English: Vainer Yu.G., Naumov A.V., Bauer M., Kador L. Dynamics of amorphous polymers at low temperatures and temporal evolution of spectra of single impurity molecules: II. Model calculations and analysis of results. Optics and Spectroscopy, 94 (6), 873 (2003)].

3. 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).

4. 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).

5. 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).

6. 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).

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).

### ***Спектральное приборостроение***

*(к.ф.-м.н. А.М. Пындык, В.Н. Крашенинников, Н.И. Улицкий, В.П. Виноградов)*

Необходимость в разработке портативных спектрометров, работающих в спектральном диапазоне 190 – 1100 нм, была вызвана развитием в отделе метода люминесцентного спектрального анализа для определения сверхнизких концентраций органических и некоторых неорганических компонентов. Для внедрения этого метода в аналитическую практику потребовались 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.

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 КР) был разработан многоканальный фотоприемник света, основанный на микроканальном электронно-оптическом преобразователе (ЭП-10, ЭП-16) и чувствительном супервидиконе ЛИ-702. Чувствительность разработанного фотоприемника позволяет детектировать слабые оптические спектры (на уровне отдельных фотоэлектронов) в реальном масштабе времени. Это особенно важно при регистрации спектров КР 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 КР и люминесценции нагретых до высоких температур веществ.



Разработанная многоканальная система регистрации спектров в сочетании со спектрографом, построенном по схеме Эберта ( $f = 150\text{мм}$ ), использовалась для определения концентрации уранила в воде ( $C \leq 10^{-7}$  г/л) люминесцентными методами, при изучении полярных сияний и для регистрации спектров КР.

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 190 – 1100 нм). Портативные спектрометры с такой линейкой с успехом используются при исследовании эмиссионных спектров турбулентных реагирующих течений в присутствии электрического разряда в аэродинамических трубах (совместно с ЦАГИ).

Малогабаритные и портативные спектрометры создавались на протяжении последних 10 лет. Всего было разработано около 20 приборов для 23 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.

## Сектор микроволновой спектроскопии



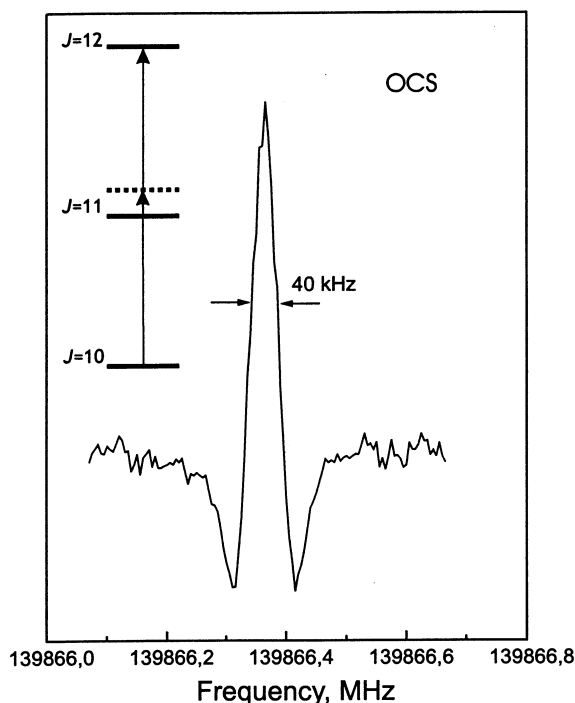
Сектор микроволновой спектроскопии был образован в 2003 г. на базе группы микроволновой спектроскопии, входившей ранее в состав лаборатории молекулярной спектроскопии высокого разрешения и аналитической спектроскопии. Заведует сектором д.ф.-м.н. Б.С. Думеш.

Основное направление деятельности сектора – создание высокочувствительной аппаратуры и исследование спектров молекул и молекулярных комплексов в миллиметровой области спектра. Совместно с Институтом метрологии времени и пространства (ИМВП) в секторе разработан внутрирезонаторный спектрометр на базе *оротрона*, являющегося высокостабильным, перестраиваемым в широком диапазоне генератором излучения в миллиметровой области спектра. *Оротрон* является лазером на свободных нерелятивистских электронах, в резонатор которого помещается газ. При регистрации спектра поглощения могут быть использованы разные способы модуляции (частотная, штарковская, оптическая) и электронная система детектирования сигнала поглощения. Созданный спектрометр предназначен для работы в области спектра 2-3 мм и характеризуется рекордной для миллиметрового диапазона чувствительностью измерения коэффициента поглощения  $\gamma_{\min} = 3 \times 10^{-10} \text{ см}^{-1}$  и доплеровским спектральным разрешением [1-2]. Этот спектрометр позволил провести уникальные исследования запрещенных переходов в молекулах типа сферического волчка, высоковозбужденных

инверсионных переходов в аммиаке и расширить аналитические возможности микроволновой спектроскопии [3-5].

В настоящее время 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 [6-7]. На этом спектрометре нами проводятся систематические исследования спектров слабо связанных ван-дер-ваальсовских комплексов R-CO, где R - H<sub>2</sub> [8], D<sub>2</sub> [9], He [10], CO [11-12], N<sub>2</sub> [13-14] и Ne [15] (см. также [16]). Первые три из них могут существовать в межзвездной среде в количествах, доступных для наблюдения. Можно надеяться, что наши результаты помогут обнаружить молекулярные комплексы в космосе.

Эти комплексы имеют настолько малую энергию связи, что мономеры могут почти свободно двигаться внутри них. Нами уже получены указания на почти свободные вращения двухатомных молекул внутри комплексов. Наиболее нетривиальные результаты получены при изучении туннельного движения в димере CO – необычная зависимость величины туннельного расщепления от вращательных квантовых чисел и массы изотопов. В настоящее время в секторе ведутся исследования, направленные на расширение рабочего диапазона спектрометра. В 2003 году был создан специализированный оротрон на диапазон 3-4 мм. Недавно при нашем участии был создан широкодиапазонный оротрон субмиллиметрового диапазона [17].



**Рис. 1.** Бездоплеровская линия двухфотонного поглощения на спектральном переходе J=12←10 в молекуле OCS [17].

В секторе также ведутся работы, направленные на совершенствование методов нелинейной спектроскопии сверхвысокого разрешения (внутри доплеровского предела). Нами впервые непосредственно измерено бездоплеровское двухфотонное поглощение во вращательных спектрах молекул. На рис.1 приведена запись линии

двухфотонного поглощения  $J=12\leftarrow 10$  в молекуле OCS [18]. Ширина этой линии на порядок меньше доплеровского предела.

Кроме указанных, в секторе ведутся работы по совершенствованию техники ЯМР-спектроскопии. Разработан непрерывный ЯМР-спектрометр дециметрового диапазона на базе резонатора "разрезное кольцо" с автоматической перестройкой рабочей частоты для измерения резонанса на магнитных ионах в магнитоупорядоченных веществах. Основное преимущество этого спектрометра в том, что он позволяет измерять ЯМР в магнитоупорядоченных веществах в сильных магнитных полях. На спектрометре этого типа, созданном в Институте физических проблем РАН с нашим участием, проделан цикл уникальных исследований антиферромагнетиков с треугольным магнитным упорядочением [19].

### Литература

1. Думеш Б.С., Костромин В.П., Русин Ф.С., Сурин Л.А. Высококочувствительный газовый радиоспектрометр двухмиллиметрового диапазона на базе оротрона. ПТЭ N5, с.102-109, (1992).
2. B.S.Dumesh and L.A.Surin, Two highly sensitive microwave cavity spectrometers. *Rev.Sci.Instrum.* **67**, p.3458-3464, (1996)
3. Б.С.Думеш, В.Д.Горбатенков, Л.А.Сурин. Наблюдение микроволнового спектра силана  $^{28}\text{SiH}_4$  в колебательной диаде состояний  $\nu_2/\nu_4$ . *Оптика и спектроскопия* т.83, 384-387, (1997).
4. B.S. Dumesh., V.A.Panfilov and L.A.Surin. High J Pure Inversion of  $\text{ND}_3$  in the  $\nu_2 = 1$  State., *J. Molecular Spectroscopy*, v. 194, 142-144, (1999).
5. B.S.Dumesh, V.D.Gorbatenkov, V.G.Koloshnikov et al. Application of highly sensitive millimeter-wave cavity spectrometer based on orotron for gas analysis. *Spectrochimica Acta, PtA*, v.53, 835-843, (1997).
6. Novel Intracavity Jet Millimeter Wave Spectrometer: Detection of b-Type Rotational Transitions of Ne-CO., *J. Molecular Spectroscopy*, v. 192, 243-246, (1998).
7. L.A.Surin, B.S.Dumesh et al Millimeter Wave Intracavity Jet OROTRON Spectrometer for Investigation of van der Waals complexes *Rev.Sci.Instrum.* **72**, 2535-2542, (2001)
8. Pak I., Surin L., Dumesh B., ... Discovery of the rotational spectrum of the weakly bound complex CO-H<sub>2</sub>., *Chem. Phys. Letters*, v. 304, 145-149, (1999).
9. L. Surin, B. Dumesh, G.Winnewisser, I. Pak The weakly bound complex CO-orthoD<sub>2</sub>: detection of millimeter-wave transitions *J. Chem. Phys.* **113**. 9351-9352, (2000)
10. L.A. Surin, D Roth, I. Pak, B. Dumesh et. al Detection of the millimeter wave spectra of the weakly bound complexes  $^3\text{He-CO}$  and  $^4\text{He-CO}$ . *J. Chem. Phys.* **112**, 4064-4068 (2000).
11. D. Roth, I. Pak, L. Surin, B. Dumesh, G.Winnewisser The CO dimer millimeter wave spectrum: detection of tunneling transitions. *J. Chem. Phys.* **113**. 3034-3038 (2000)
12. A.R.W. McKellar, L.A. Surin et al Millimeter wave spectra of the CO dimer: Three new states and further evidence of distinct isomers *J. Mol. Spectrosc.* v. 214, p. 87-93, (2002)
13. Yunjie Xu, W. Jäger, L. A. Surin et al Microwave and millimeter wave study of Ortho-N<sub>2</sub> states of CO-N<sub>2</sub> *J. Chem. Phys.* v. 111, 10476-10483 (1999)
14. L.Surin, B.Dumesh et al The millimeter wave observation of the bending vibration of the CO-orthoN<sub>2</sub> complex. *J. Molecular Structure* v. 612, p. 207-211, (2002).
15. D. Roth, I. Pak, L. Surin, B. Dumesh, G.Winnewisser Millimeter wave spectroscopy of Ne-CO. *Z.Naturforsch.* **55a**, No 9, 754-758, (2000)
16. Б.С.Думеш, Микроволновая спектроскопия молекулярных комплексов R-CO (R=Ne, He, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>), представляющих астрофизический интерес, УФН **169**, 351-353 (1999).
17. V.L. Bratman, B.S. Dumesh, A.E. Fedotov, et al Broadband orotron operation at millimeter and submillimeter waves. *Int. J. Infrared and Millimeter Waves*, , v.23, No.11, pp. 1595-1601, (2002)
18. L. Surin, B. Dumesh, F. Rusin, G.Winnewisser , I. Pak Doppler-free two-photon millimeter wave transitions in OCS and CHF<sub>3</sub> *Phys. Rev. Lett.* **86**, 2002-2005, (2001)
19. Б.С.Думеш Влияние квантовых флуктуаций на магнитные свойства квазиодномерных треугольных антиферромагнетиков. УФН **170**, 403-418 (2000).

## 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 – 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 проф. 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 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 профессор 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 профессор Б.Н.Маврин. Исследования в лаборатории проводились по следующим основным направлениям:



- спектроскопия оптических фононов при фазовых переходах в органических, нелинейных, сверхпроводящих и суперионных кристаллах;
- спектроскопия поверхностных и 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 дейтронов в КРС нелинейных кристаллов  $Rb(D_xH_{1-x})_2PO_4$  [7]. Отдельный цикл составляют исследования оптических фононов методами ИК спектроскопии и КРС полупроводниковых кристаллов  $A^{II}B^{VI}$ ,  $A^{III}B^{VI}$  и  $A^{III}B^{III}C_2^{VI}$  и их семейств твердых растворов (всего более 200 кристаллов), а также их перестроек с изменением гидростатического давления до 12 кбар в полупроводниковых кристаллах соединений  $A^{III}B^{VI}$ ,  $A^{III}B^{III}C_2^{VI}$  (около 50 составов), в некоторых из которых были обнаружены ранее неизвестные структурные фазовые переходы.

После открытия высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП) в тематике

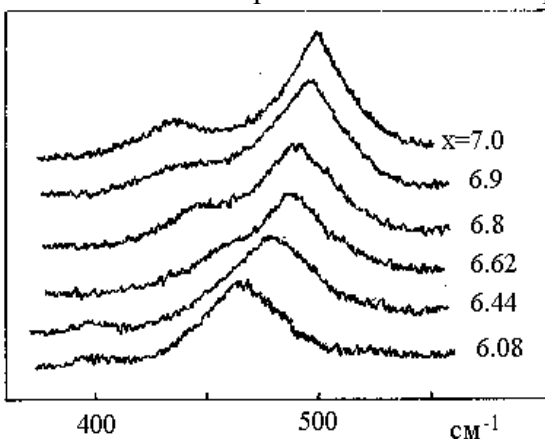


Рис.1. Зависимость спектра КРС  $A_g$ -мод от содержания кислорода в ВТСП-монокристаллах  $YBa_2Cu_3O_x$  [9]

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

Обнаружено, что с ростом температуры возникает интерференция однофононных оптических низкочастотных мод в кристалле  $\gamma-Li_3PO_4$ , сопровождающаяся антирезонансом. Численный анализ спектра в области взаимодействия мод показал сильную температурную зависимость константы взаимодействия, определяемой ангармонической связью оптических и акустических мод [10].

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.) [11].

Для решения многих важных задач физики кристаллов требовалось повысить фотометрическую точность спектральных измерений и увеличить разрешающую способность ИК спектрометров. С этой целью под руководством профессоров Г.Н.Жижина и Е.А.Виноградова был создан комплекс автоматизированных ИК спектрометров, перекрывающий широкий спектральный диапазон от 0,8 до 50 мкм с возможностью расширения до 500 мкм, с разрешением до  $0,005 \text{ см}^{-1}$ , в том числе фурье-спектрометр УФС-02.

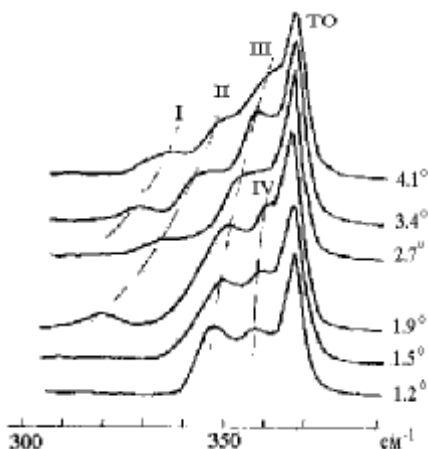
Лаборатория активно участвовала в создании первых отечественных спектрометров КРС с лазерным возбуждением (ДФС-24 и ДФС-42) (к.ф.-м.н. Х.Е.Стерин, проф. Б.Н.Маврин). В лаборатории были построены первые в стране оригинальные макеты лидара и установок для многоканальной и скоростной регистрации спектров КРС [12].

В 1976 г. из лаборатории выделилась группа сотрудников, положившая начало отделу спектрального приборостроения в ЦКБ УП АН СССР, специализирующемуся на разработках фурье-спектрометров. Научное и техническое сотрудничество ИСАН с ЦКБ УП РАН сохраняется до сих пор (проф. Г.Н.Жижин, к.ф.-м.н. Н.Ю.Болдырев).

### ***Спектроскопия поверхностных состояний. Поверхностные электромагнитные волны***

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 [13]. 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” [13], слои после ионной имплантации поверхности кварца).



Впервые обнаружено явление термостимулированной эмиссии поверхностных поляритонов, и на его основе предложен метод получения дисперсионных кривых поверхностных поляритонов (кристаллический селенид цинка и его пленки на металлах [14]), а также метод исследования фазовых переходов [15].

Для получения ИК спектров монослоевых и субмонослоевых пленок (органических и неорганических) на поверхности металлов одновременно с американскими учеными мы применили поверхностные электромагнитные



волны (ПЭВ), возбуждаемые CO<sub>2</sub>-лазером с перестройкой частоты. Позднее призмное возбуждение было заменено апертурным, что позволило развить метод интерференционных измерений оптических постоянных пленок и поверхностей проводящих материалов (металлов, высокотемпературных сверхпроводников), а также диэлектриков в области существования спектра поверхностных поляритонов.

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].

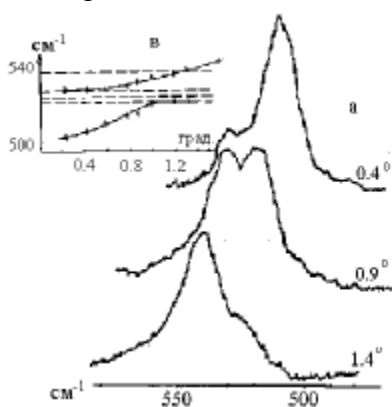
Рис. 2. Зависимость спектров КРС на волноводных р-модах нижней ветви монокристаллической пленки GaP от угла рассеяния.

Впервые были исследованы спектры КРС сверхтонких аморфных сверхрешеток Si-SiO<sub>2</sub>. 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.

### Спектроскопия объемных поляритонов

КРС является эффективным методом исследования объемных колебательных поляритонов, позволяющих получить дисперсионные характеристики в диапазоне волновых векторов  $10^3$ - $10^5$  см<sup>-1</sup>, 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 *κ*-спектроскопии поляритонов [19,20], измерена дисперсия поляритонов в ряде кристаллов, проанализированы ширина и форма линии комбинационного рассеяния и исследованы ангармоничность и влияние двухчастичных состояний на дисперсию поляритонов [21].

КРС на поляритонах было использовано для анализа эффекта сильного ангармонизма фононов, приводящего к образованию связанных состояний (бифононов)

Рис.3. а – КРС-дублеты ферми-резонанса поляритона с двухфононной зоной в кристалле LiNbO<sub>3</sub>; в - зависимость  $\omega(\theta)$  в области ферми-резонанса

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 в кристалле  $\text{LiNbO}_3$  [22].

### Гиперкомбинационное рассеяние света

При достаточно интенсивном облучении среды светом с частотой  $\omega_i$  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 [23]. С помощью этого метода обнаружены запрещенные в КР и ИК поглощении колебания, определены оптические и молекулярные параметры ряда материалов.

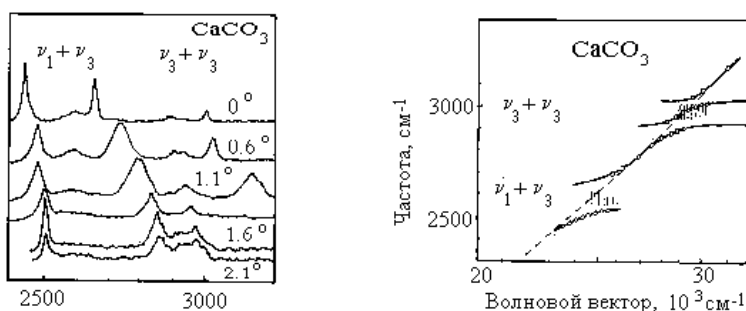


Рис. 4. Спектры ГКР (слева) и дисперсия  $E_1$ -поляритонов (справа) в области двухфононных состояний кальцита [28].

Обнаружены поляритоны [24-26] и продольно-поперечное расщепление дипольных колебаний в стеклах и жидкостях [27], поляритонные Ферми-резонансы (рис.4) и поляритон-колебательные резонансы в центросимметричных средах. ГКР – единственно возможный метод исследования объемных поляритонов и связанных с эффектами в центросимметричных средах. С помощью ГКР исследованы низкочастотные спектры дипольных мягких мод в центросимметричных кристаллах, которые запрещены в КРС и трудно исследуемы в ИК поглощении. В ГКР 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 [29].

### Спектроскопия углеродных материалов под давлением

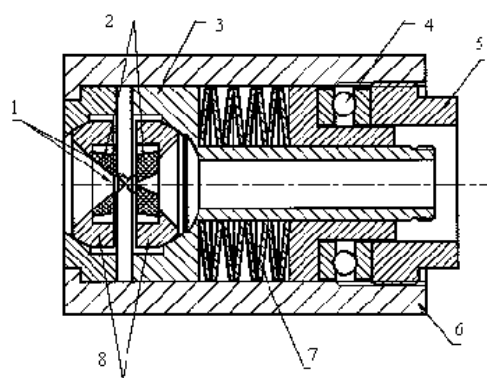


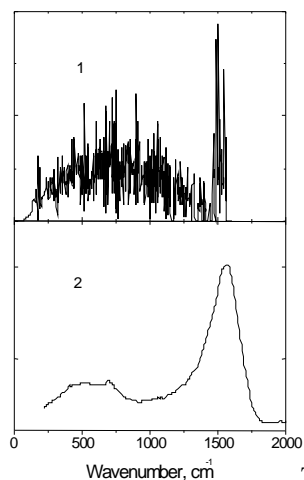
Рис. 5. Схема алмазной ячейки высокого давления: 1 – алмазные наковальни, 2 – твердосплавные подставки, 3 – подвижной поршень, 4 – упорный подшипник, 5 – зажимная гайка, 6 – корпус, 7 – пружины, 8 – система юстировки.

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 АКВД (рис. 5) 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.

С помощью АКВД 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 [30]. 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 [31]. С помощью этой камеры методом КРС удалось исследовать фазовые переходы под давлением в SiC. Возникновение новой фазы наблюдалось по исчезновению LO и TO-фононов в спектре исследуемого образца при 104 ГПа. Структура новой фазы кубическая типа NaCl, поскольку для этого структурного типа КРС запрещено по правилам отбора.

В настоящее время значительное развитие получили также исследования структуры и свойств новых материалов, синтезируемых из фуллеритов  $C_{60}$  и  $C_{70}$  путем их полимеризации при воздействии “давление-нагрев-сдвиговые деформации” непосредственно под давлением, и метастабильных состояний. Получен ряд новых структур. Данные по новым кристаллическим структурам включены в Международные кристаллографические таблицы. Исследованы спектры КРС, ИК и спектры люминесценции новых фаз [32]. Найдены фазовые P-T диаграммы синтеза 1D, 2D и 3D-полимеризованных  $C_{60}$  и  $C_{70}$ . Измерения сжимаемости 3D-полимеризованного  $C_{60}$  методами рентгеноструктурного анализа позволили определить значение объемного модуля  $B_0 \approx 540 \pm 80$  ГПа, которое по величине сопоставимо с объемным модулем упругости кристалла алмаза.



При образовании 3D-полимеризованных фаз спектры КРС трансформировались: узкие линии, свойственные молекулярному фуллерену, превращались в широкие полосы, что интерпретировалось как структурный переход от молекулярной структуры в каркасную трехмерную структуру с образованием ковалентных межмолекулярных связей. Используя результаты дифракционных и квантово-химических исследований, предложивших структуру элементарной ячейки 3D-полимеризованного фуллерена  $C_{60}$ , был произведен анализ динамики решетки с учетом двух- и трехчастичных взаимодействий, вычислена плотность колебательных состояний и показано, что она коррелирует с наблюдаемым спектром КРС (рис. 6).

Рис. 6. Вычисленная плотность колебательных состояний (вверху) и спектр КРС (внизу) 3D-полимеризованной фазы  $C_{60}$  [33].

При трансформации  $C_{60}$  под давлением и температурах до  $1500^\circ C$ , а также при облучении монокристалла алмаза быстрыми нейтронами, обнаружена новая углеродная фаза, которая представляет собой «промежуточную» структуру между графитом и алмазом, состоящую из сопряженных  $sp^2$ - и  $sp^3$ -связей углерода. Вычисленный колебательный спектр предложенной новой структуры и экспериментальный спектр КРС оказались в хорошем согласии. Методами высокоразрешающей электронной микроскопии (с атомным разрешением) изучена структура новой углеродной фазы и показана ее обратимость в графит при нагреве электронным пучком.

## Лаборатория спектроскопии полупроводниковых структур

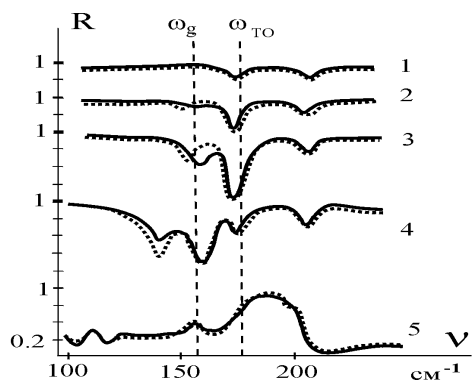
Лаборатория спектроскопии полупроводниковых структур создана в апреле 1990 года (заведующий лабораторией д.ф.-м.н. профессор Е.А.Виноградов). В неё вошли сотрудники лаборатории спектроскопии кристаллов ИСАН, работавшие ранее с Е.А.Виноградовым, и для исследования кинетики электронных возбуждений в сверхрешетках на несколько лет к ним присоединилась группа д.ф.-м.н. Д.Н.Никогосяна из трех человек из лаборатории спектроскопии ультрабыстрых процессов ИСАН, а в 2001 году в лабораторию вошла тематическая группа спектроскопии поверхности твердого тела, возглавляемая проф. В.А.Яковлевым.

Достижения сотрудников лаборатории в первые несколько лет после ее организации основаны на результатах, полученных ими ранее в Отделе спектроскопии твердого тела. Основные достижения лаборатории можно сформулировать следующим образом.

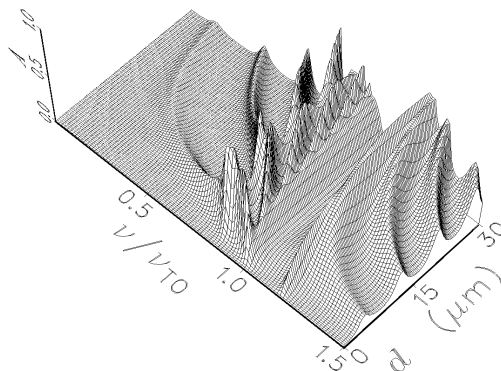
Разработаны методы экспериментального исследования угловой зависимости спектров термостимулированного ИК излучения кристаллов и пленок и восстановления из них дисперсии объемных и поверхностных поляритонов. Этими методами экспериментально (Е.А.Виноградов и Г.Н.Жижин) и теоретически (к.ф.-м.н. Т.А.Лескова, д.ф.-м.н. В.И.Юдсон, д.ф.-м.н. А.Г.Мальшуков и д.ф.-м.н. В.И.Рупасов, теоретический отдел ИСАН) изучены собственные состояния электромагнитного поля (колебательные поляритоны и плазмон-поляритоны) в тонкопленочных структурах типа “вакуум - пленка полупроводника - металлическая подложка” и “призма НПВО - вакуумный зазор - пленка полупроводника - металл” [13-15,20,34-36]. Экспериментально наблюдалось термостимулированное свечение на частотах нерадиационных поверхностных поляритонов кристаллов полупроводников, металлов и полупроводниковых пленок на металлических подложках при наличии призмы НПВО над объектом [14,20,34-36]. В структурах типа “призма НПВО - 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 [20,35].

Эти результаты экспериментальных и теоретических исследований спектров оптических фононов кристаллов свидетельствуют также о том, что в кристаллах конечных размеров поглощение света осуществляется не в один шаг (как считалось ранее – фотоны, поглощаясь, рожают фононы), а фотоны, проникая в кристалл, сначала 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 взаимодействия поляритоны превращаются 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 распада поляритонов [35].

Обнаружены 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 [20,35]. Обнаружены эффекты взаимодействия между возбуждениями в граничащих средах, а также с интерфейсными плазмонами [20,35].



**а**



**б**

Рис.7. **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 –  $d = 0,9\mu\text{м}$ , 2 –  $d = 1,7\mu\text{м}$ , 3 –  $d = 2,3\mu\text{м}$ , 4 –  $d = 5\mu\text{м}$ , 5 –  $d = 700\mu\text{м}$ . Точки – эксперимент, сплошные линии – расчет [20,35]. **б** – зависимость р-поляризованного поглощения пленок  $\text{Cd}_{0.05}\text{Zn}_{0.95}\text{Te}$  при  $\varphi=20^\circ$  от толщины пленок, расчет [20,35].

Методами колебательной спектроскопии Е.А.Виноградовым и д.ф.-м.н. В.М.Бурлаковым исследованы сегнетоэлектрические фазовые переходы в слоистых полупроводниках типа  $\text{TlInS}_2$  и  $\text{TlGaSe}_2$ . 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 [6,37-39]. Обнаружены также новые особенности структурного фазового перехода вблизи поверхности полупроводника. Экспериментально установлено, что поверхность может стабилизировать низкотемпературную фазу кристалла в некотором прилегающем слое значительной толщины ( $\sim 1 \mu\text{м}$ ) [6,39].

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 [40,41]. 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 [42,43] и деструктивная интерференция модуляционных неустойчивостей нелинейных волн в решетке [44].

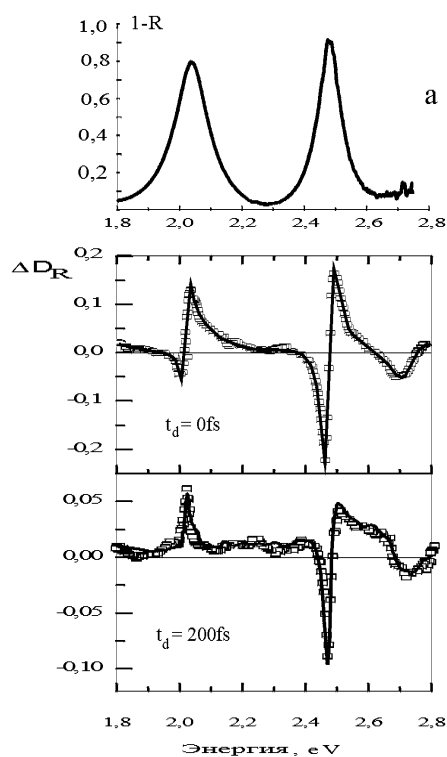
Е.А.Виноградовым и к.ф.-м.н. В.А.Зяцем совместно с Отделением физики твердого тела ФИАН (к.ф.-м.н. Ф.А.Пудонин) были проведены исследования оптических свойств сверхрешеток на основе чередующихся ультратонких ( $\sim 1 \text{ нм}$ ) слоев аморфного кремния и двуокиси кремния. По спектрам фотолюминесценции и спектрам возбуждения фотолюминесценции (совместно с д.ф.-м.н. Д.Н.Никогосян и Ю.А.Репеевым), а также из спектров комбинационного рассеяния света (совместно с д.ф.-м.н. Б.Н.Мавриным и к.ф.-м.н. В.Н.Денисовым) и из спектров  $\lambda$ -модуляционного поглощения света была определена структура электронных уровней размерного квантования в сверхрешетках [45]. Показано, что коротко-периодические сверхрешетки обладают строго двумерной структурой размерно-квантованных подзон кремния и, что процессы рекомбинации неравновесных носителей заряда в них определяются в первую очередь вероятностями резонансного переноса

носителей заряда из подзон кремния на глубокие примесные уровни германия в барьерных слоях двуокиси кремния [46-48].

В последнее время усилия сотрудников лаборатории сконцентрированы в основном на трех направлениях работы:

- экспериментальные и теоретические исследования мод полости, эффектов ближнего поля и процессов превращения ближнего поля в электромагнитное излучение;
- экспериментальные исследования оптических фононов в новых материалах;
- создание фурье-спектрометров на ближнюю и среднюю ИК области спектра.

Первое направление включает исследования мод полости и их взаимодействия с внешним электромагнитным полем, используя методы спектроскопии с фемтосекундным временным и субволновым пространственным разрешением.



Исследования фотоиндуцированной перестройки мод полости (пленки ZnS и ZnSe на Cr, Ni и Cu) под действием ультракоротких лазерных импульсов (Е.А.Виноградов совместно с к.ф.-м.н. Ю.А.Матвейцом, лаборатория ультрабыстрых процессов, и к.ф.-м.н. Ю.Е.Лозовиком, лаборатория спектроскопии наноструктур) открывают возможности управления оптической толщиной полости и граничными условиями для мод полости в фемтосекундной шкале времен [49-52].

б Рис.8. а - Спектр поглощения модами полости в пленке ZnSe толщиной 400 нм на хrome. б – Временная эволюция спектров разностного отклика пленки ZnSe (400 нм) на Cr подложке. Энергия фотона возбуждения  $\eta\omega_{\text{pul}} = 2,34$  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 [35,50].

Спектры рис 8б 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 [52].

Сочетание методов оптической спектроскопии с развиваемой в лаборатории туннельной микроскопией и оптической микроскопией ближнего поля (к.ф.-м.н. В.Н.Конопский) позволит 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 [53-55]. 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 [54]. 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 [55].

Второе направление включает экспериментальные исследования особенностей спектра оптических фононов в различных новых кристаллических материалах и кристаллических твердых растворах, а также исследование оптических фононов в окрестности структурных фазовых переходов в системах пониженной размерности (слоистые кристаллы и тонкие пленки). Проводятся оптические и структурные исследования сегнетокерамики, облученной сильноточным импульсным пучком электронов (совместно с ОИЯИ, Дубна) [56,57].

Наряду с фундаментальными исследованиями в лаборатории постоянно проводятся работы по развитию методов спектроскопии. В настоящее время успешно проходит испытания разработанный и изготовленный в лаборатории фурье-спектрометр на видимую и ИК области спектра (к.ф.-м.н. Н.Ю.Болдырев совместно с В.М.Кривцуном, лаб. молекулярной спектроскопии высокого разрешения и аналитической спектроскопии), который планируется использовать для изучения спектров многослойных тонкопленочных структур и новых кристаллических материалов.

### *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 (максимум электрического поля ПЭВ находится точно на границе раздела сред) был достигнут значительный прогресс в исследовании сверхтонких пленок и поверхностей твердого тела [13,58]. 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) [59]. Так, было показано, что измерение комплексного волнового вектора ПЭВ

позволяет определить коэффициент отражения металлических зеркал с высокой точностью [60].

Исследования ПЭВ начались в 10 мкм области спектра (CO<sub>2</sub>-лазер) [13], затем распространение ПЭВ по металлам исследовалось на дискретных частотах в ближней ИК и видимой областях (He-Ne лазер) [61]. В последние годы спектральный диапазон значительно расширился в связи с использованием фурье-спектрометров [62] и лазера на свободных электронах, перестраиваемого в широком ИК диапазоне: 5-100 мкм (совместно с Институтом физики плазмы, г. Утрехт, Нидерланды). 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 [63]. Методом фазовой спектроскопии ПЭВ в длинноволновой ИК области в окрестности фононных резонансов (“остаточные лучи”) исследованы приповерхностные слои кристаллов  $\text{CaF}_2$ ,  $\text{BaF}_2$ ,  $\text{MgO}$ ,

$\text{LiNbO}_3$ . Определены параметры распространения ПЭВ и по ним рассчитаны оптические постоянные (аномальная дисперсия) исследованных кристаллов [64].

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 (4,5 мкм), идущая из приповерхностного слоя кварца в направлении, перпендикулярном ее плоскости. Изучены частотная зависимость и влияние тонкой органической пленки на эффективность генерации второй гармоники [65]. 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 [66,67]. 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 [68].

При изучении оптических и электрических свойств сверхтонких пленок ряда металлов ( $\text{Nb}$ ,  $\text{Cu}$ ,  $\text{Ni}$ ,  $\text{W}$ ,  $\text{Mo}$ ,  $\text{Ti}$ ), 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 [69,70].

Изучаются и другие объекты, интересные с точки зрения квантовых эффектов: сверхрешетки, а также пористый кремний [71,72]. 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 (генерация второй гармоники, суммарной и разностных частот) в таких структурах. Получены спектры ГСЧ SiH колебаний монослоя водорода в фотонных кристаллах на основе пористого кремния [73-75].

Экспериментально и теоретически изучены параметры распространения поверхностных плазмонов (ПП) на гофрированной поверхности вблизи энергетической щели, открывающейся при брегговском условии отражения при условии, когда ширина брегговской 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 брегговской 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 брегговской 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[76].

**Сектор Фурье-спектроскопии  
Центра коллективного пользования  
"Оптико-спектральные исследования" ИСАН**



Сектор Фурье-спектроскопии Центра коллективного пользования "Оптико-спектральные исследования" ИСАН был создан в 2001 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 четыре научных сотрудника, кроме того, обычно работает несколько студентов и аспирантов.

Фурье-спектроскопии в отделе уделялось постоянное внимание, начиная с основания ИСАН 35 лет назад. Разрабатывались теоретические и методические аспекты фурье-спектроскопии. Под научным руководством профессора Г.Н. Жижина в ЦКБ УП АН СССР 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 ( $0.005 \text{ см}^{-1}$ ) УФС-02, спроектированный совместно ИСАН и ЦКБ УП АН СССР под руководством профессоров Г.Н. Жижина и Е.А. Виноградова и изготовленный в ЦКБ УП АН СССР. В 1984-85 гг. на фурье-спектрометре были получены первые результаты, продемонстрировавшие

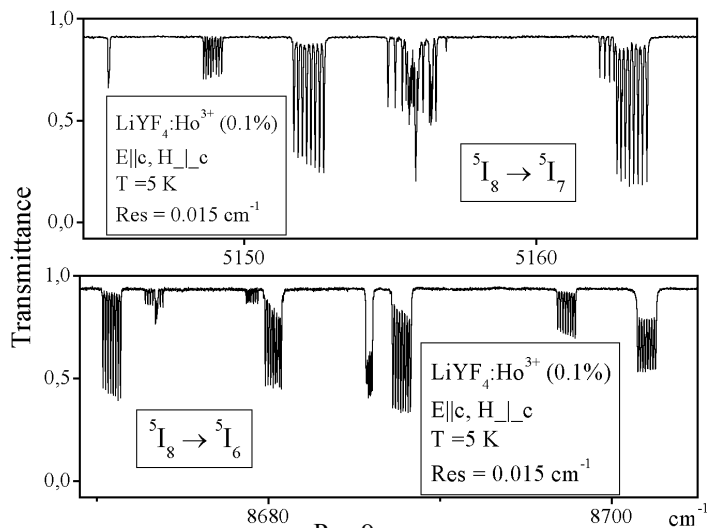


Рис.9  
Спектр поглощения иона  $\text{Ho}^{3+}$  в монокристалле  $\text{Li}(\text{Y}_{0.999}\text{Ho}_{0.001})\text{F}_4$ .

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  $0,0026 \text{ см}^{-1}$ .

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  $\text{LiYF}_4$ , активированных гольмием или эрбием. Благодаря отличному оптическому качеству кристаллов, особенностям энергетического спектра и уникальным теплофизическим свойствам  $\text{LiYF}_4$  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  $\text{Ho}^{3+}$  и  $\text{Er}^{3+}$ , наиболее близкие к  $\text{Y}^{3+}$  по ионному радиусу, могут входить в кристаллическую решетку в высоких концентрациях, вплоть до стопроцентного замещения иттрия). Кроме того, эти кристаллы, обладая 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.

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 [77-79]. Примеры спектров со сверхтонкой структурой показаны на рис.9. 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  $\text{CsCdBr}_3:\text{Pr}^{3+}$  [80] и  $\text{LiYF}_4:\text{Er}^{3+}$  [81]. Отметим, что для крамерсовых ионов (с нечетным числом электронов), как  $\text{Er}^{3+}$ , СТС спектральных линий носит совершенно иной характер, чем для некрамерсовых ионов.

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 [82, 83]. На рис.10 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  ${}^7\text{Li}$  и  ${}^6\text{Li}$ , 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  $0,01-0,03 \text{ см}^{-1}$ . 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 [83, 84].

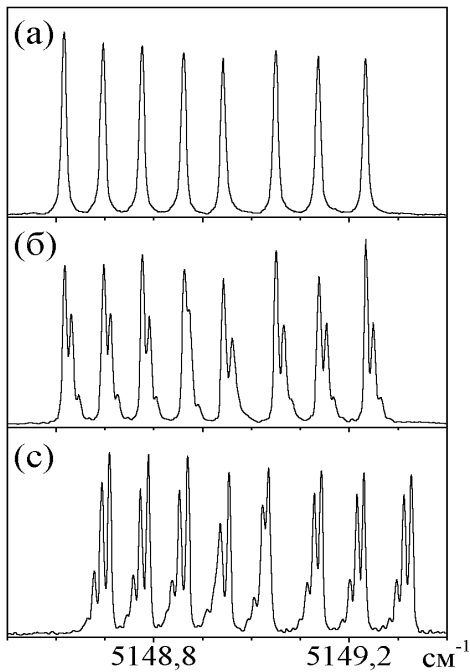


Рис. 10

Спектр поглощения иона  $^{165}\text{Ho}^{3+}$  в а) моноизотопном 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  $^6\text{Li}$ .

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 [81, 80]. Так, на примере  $\text{CsCdBr}_3:\text{Pr}^{3+}$  было показано, что фонная 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 [80].

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  $\text{Cu-O}$ ), возрос интерес

к низкоразмерным магнетикам. Были получены в виде больших монокристаллов хорошего качества различные соединения, содержащие цепочки магнитных  $d$ -ионов с полуцелочисленным ( $\text{Cu}^{2+}$ ) или целочисленным ( $\text{Ni}^{2+}$ ) 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. Рис. 11 иллюстрирует суть метода РЗ спектроскопического зонда в магнитных соединениях: регистрируется расщепление спектральных линий, вызываемое обменным расщеплением крамеровских дублетов в магнитно-упорядоченном состоянии. На рис. 12 в качестве примера приведен спектр крамерсова иона  $\text{Er}^{3+}$  в  $\text{Er}_2\text{Cu}_2\text{O}_5$  при температурах как выше так и ниже температуры Нееля  $T_N=28\text{ K}$  [85]. Хорошо видно расщепление спектральных линий. Зависимость

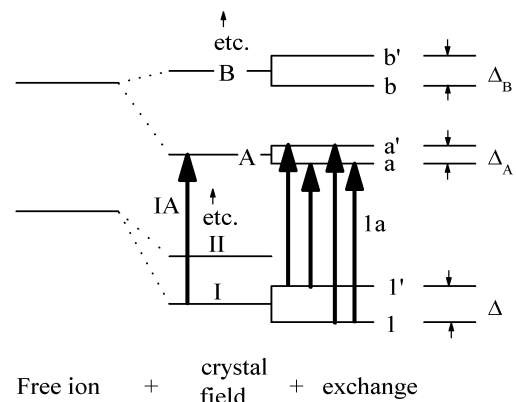


Рис. 11

Уровни крамерсова иона в магнитноупорядоченном кристалле

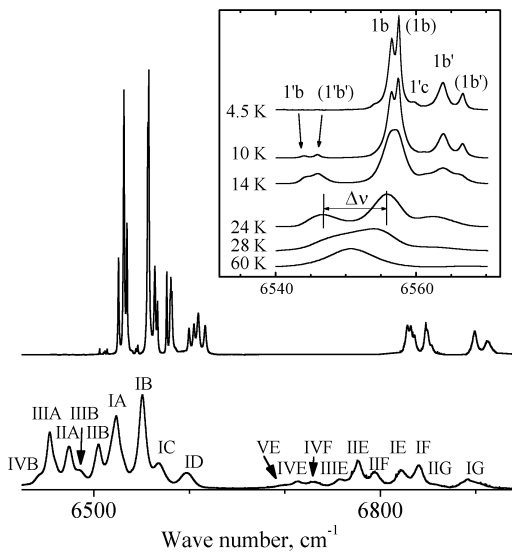


Рис. 12

Поглощение в области оптического перехода  ${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$  в ионе  $\text{Er}^{3+}$  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). На вставке: одна из линий более подробно.

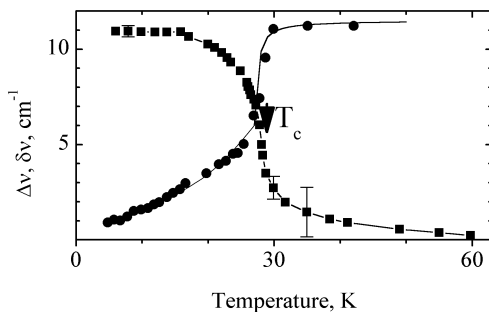


Рис. 13

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

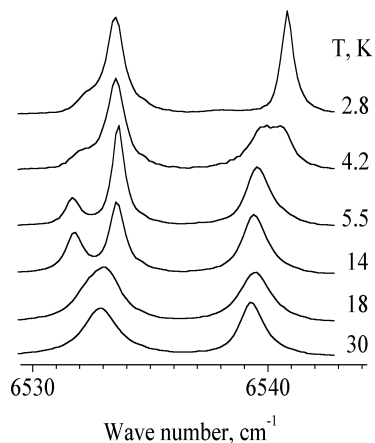


Рис. 14

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

расщепления от температуры иллюстрирует рис. 13. «Хвост» остаточных расщеплений при  $T > T_N$  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. 12, 13). Пример изменения спектра при спин-переориентационном переходе первого рода, когда в узком интервале температур сосуществуют две различные магнитные фазы, показан на рис. 14.

Методом РЗ спектроскопического зонда были исследованы соединения, сопутствующие ВТСП типа 1-2-3 ( $\text{R}\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ ): так называемые «голубые» фазы  $\text{R}_2\text{Cu}_2\text{O}_5$ , «зеленые» и «коричневые» фазы  $\text{R}_2\text{BaCuO}_5$ , а также цепочечные никелаты  $\text{R}_2\text{BaNiO}_5$  (здесь R-редкая земля или иттрий). Основные результаты этих исследований, список публикаций и обсуждение методических аспектов можно найти в обзоре [86].

Другое направление в работах сектора по спектроскопии магнитных соединений – это исследование квантовых эффектов в квазиодномерных магнетиках с целочисленными и полуцелочисленными значениями спина. Удалось впервые наблюдать появление новых линий в ИК спектре из-за удвоения примитивной кристаллической ячейки («сложенные» моды) при спин-пайерлсовском переходе ( $s=1/2$ :  $\text{CuGeO}_3$  [87]) и зарядово-магнитоэластическом переходе ( $s=1/2$ ,  $\text{NaV}_2\text{O}_5$  [88]), а также оптические проявления открывания щели в спектре магнитных возбуждений при такого рода переходах [88], рис. 15 (см. также [89]).

Наши дальнейшие исследования показали, что в  $\text{NaV}_2\text{O}_5$  зарядовые, магнитные и фононные возбуждения сильно взаимодействуют друг с другом [90]. В результате, решетка димеризуется, спины спариваются с образованием немагнитного состояния и заряды упорядочиваются в процессе единого фазового перехода [91]. При этом возникает зигзагообразное распределение заряда по «лестнице» [92].

Что касается Холдейновских квазиодномерных магнетиков с целочисленным спином, следует упомянуть недавнее исследование системы  $(\text{Er}_x\text{Y}_{1-x})_2\text{BaNiO}_5$ . Спектроскопически мы наблюдаем переход от одномерного квантового ( $\text{Y}_2\text{BaNiO}_5$ ) к трехмерному классическому ( $\text{Er}_2\text{BaNiO}_5$ ) 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 [93].

Перечисленные направления деятельности сектора фурье-спектроскопии поддерживались Российскими грантами РФФИ, Президиума РАН, Минпромнауки, а также совместными с зарубежными партнерами программами ИНТАС и РАН-НЦНИ

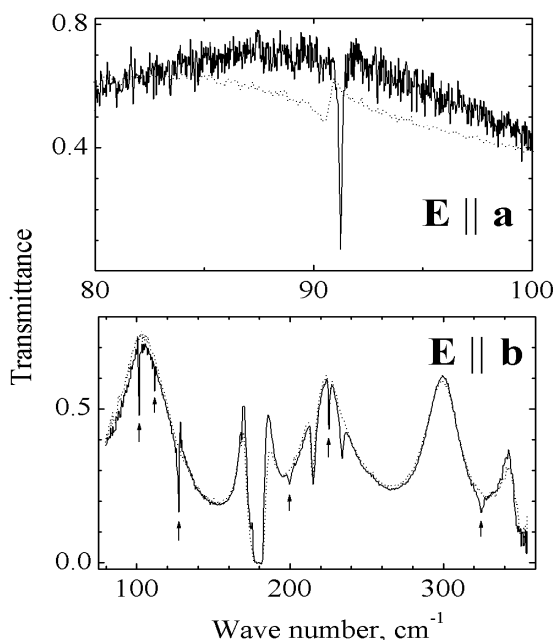


Рис. 15

Поглощение  $\alpha'$ - $\text{NaV}_2\text{O}_5$  ( $T_c=35$  К) при  $37\text{ К} > T_c$  (пунктирная линия) и при  $6\text{ К} < T_c$  (сплошная линия). «Сложенные» моды обозначены стрелками. Резонанс Фано (E||a) обусловлен взаимодействием фонона с континуумом.

(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 прикладной химии твердого тела Высшей школы химии Парижа (CNRS-UMR 7475), Лаборатория физической химии твердого тела Парижского Университета (Франция), Университет г. Гронингена (Нидерланды), Университет г. Турку (Финляндия), Институт Низких Температур и Структурных Исследований Польской АН (Польша), Институт науки о материалах г. Мадрида (Испания), Мадридский университет (Испания), Университет Кантербери (Новая Зеландия), Институт физики твердого тела Токийского Университета (Япония)

### Монографии отдела спектроскопии твердого тела

1. Х.Е.Стерин, В.Т.Алексян, 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.

## Литература

1. Г.Н.Жижин. Спектроскопия низкотемпературных кристалловедческих 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 решеткой циклогексана на частоте  $55 \text{ см}^{-1}$  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  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  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  $\text{YBa}_2\text{CuO}_x$  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. V.N.Denisov, A.N.Ivlev, A.S.Lipin, B.N.Mavrin, V.G.Orlov. Raman spectra and lattice dynamics of  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ . J.Phys.:Cond.Mat., 9, 4967 (1997).
12. А.В.Бобров, Х.Е.Стерин, В.Б.Подобедов. Дистанционная регистрация спектров КРС. Опт. и Спектр., 39, 886 (1975).
13. 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).
14. Е.А.Виноградов, Г.Н.Жижин. Термостимулированное излучение поверхностными колебаниями атомов кристаллической решетки селенида цинка. Письма в ЖЭТФ, 24, N 2, 84-86 (1976).
15. Е.А.Виноградов, Г.Н.Жижин, И.И.Хаммадов, В.А.Яковлев. Термостимулированное излучение поверхностных поляритонов молибдата гардолия в окрестности фазового перехода. ФТТ, 23, N 2, 580-581 (1981).
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. 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.

20. E.A.Vinogradov. "Vibrational Polaritons in Semiconductor Films on Metal Surfaces". *Physics Reports*, 217, No.4, p. 159-223, 1992.
21. Б.Н.Маврин, Х.Е.Стерин. Двухчастичные состояния и спектр поляритонов в кристалле GaP. *ФТТ*, 18, 3028 (1976).
22. Б.Н.Маврин, Х.Е.Стерин. Ферми-резонанс поляритона с бифононом в кристалле LiNbO<sub>3</sub>. *Письма в ЖЭТФ*, 16, 265 (1972).
23. 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).
24. В.Н.Денисов, Б.Н.Маврин, В.Б.Подобедов, Х.Е.Стерин. Гиперкомбинационное рассеяние на поляритонах в центросимметричном кристалле SrTiO<sub>3</sub>. *Письма в ЖЭТФ*, 31, 111 (1980).
25. В.Н.Денисов, Б.Н.Маврин, В.Б.Подобедов, Х.Е.Стерин. ГКР на поляритонах в жидком четыреххлористом углероде. *Письма в ЖЭТФ*, 35, 312 (1982).
26. В.Н.Денисов, Б.Н.Маврин, В.Б.Подобедов, Х.Е.Стерин. Гиперкомбинационное рассеяние на поляритонах в плавленном кварце. *Письма в ЖЭТФ*, 32, 340 (1980).
27. В.Н.Денисов, Б.Н.Маврин, В.Б.Подобедов, Х.Е.Стерин. Гиперкомбинационное рассеяние и продольно-поперечное расщепление колебаний в плавленном кварце. *ФТТ*, 20, 3485 (1978).
28. В.Н.Денисов, Б.Н.Маврин, В.Б.Подобедов, Х.Е.Стерин. Эффекты ангармонизма в поляритонных спектрах ГКР кристалла кальцита. *ЖЭТФ*, 82, 406 (1982).
29. В.Н.Денисов, Б.Н.Маврин, В.Б.Подобедов, Х.Е.Стерин. ГКР и правила отбора по волновому вектору и матричному элементу в колебательных спектрах стекол и жидкости. *ЖЭТФ*, 84, 1266 (1983).
30. V.Blank, M.Popov, S.Buga, V.Davydov, V.N.Denisov, A.N.Ivlev, B.N.Mavrin. Is C<sub>60</sub> fullerite harder than diamond? *Phys.Lett.*, A188, 281 (1994).
31. 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).
32. M.Popov, Y.Koga, S.Fujiwara, B.N.Mavrin, V.D.Blank. Carbon nanocluster-based superhard materials. *New Diamond and Frontier Carbon Technology*, 12, 229 (2002).
33. L.A.Chernozatonskii, N.R.Serebryanaya, B.N.Mavrin. The superhard crystalline three-dimensional polymerized C<sub>60</sub> phase. *Chem.Phys.Lett.*, 316, 199 (2000).
34. 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).
35. Е.А.Виноградов. Поляритоны полупроводниковой микрополости. *УФН*, 172 (12), с. 1371-1410, 2002.
36. Е.А.Виноградов, И.И.Хаммадов. "Спектроскопия объемных и поверхностных фононов кристаллов". Издательство "ФАН", Ташкент, 166 с., 1989.
37. В.М.Бурлаков, Е.А.Виноградов, Ш.Нуров, Н.М.Гасанлы. "Параметры полос колебательного спектра TlInS<sub>2</sub> в области температур фазовых переходов". *ФТТ*, 27, No.11, с.3365-3368, 1985. *Soviet Physics Solid State*, 27, p.2025-2027, 1985.
38. А.А.Аникьев, В.М.Бурлаков, М.Р.Яхъев. "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.
39. 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.
40. 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).

41. 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 (TaSe<sub>4</sub>)<sub>2</sub>I: Numerical and experimental study. J.Physics B, 244/1-4, 96-102 (1998).
42. V.M.Burlakov, S.A.Darmanyany, 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).
43. Burlakov V.M., Darmanyany S.A., Pyrkov V.N. "Modulation instability and recurrence phenomena in anharmonic lattices". Phys.Rev. B 54, 3257-3265 (1996).
44. Burlakov V.M. "Interference of mode instabilities and pattern formation in anharmonic lattices". Phys.Rev.Lett. **80**, 3988 (1998).
45. 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<sub>2</sub> 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.
46. A.V.Zayats, Yu.A.Repeyev, D.N.Nikogosyan, E.A.Vinogradov. "Relative recombination in short-period a -Si/SiO<sub>2</sub> superlattices". Journal of Luminiscence, 52, p.335-343, 1992.
47. A.V.Zayats, Yu.Repeyev, D.N.Nikogosyan, E.A.Vinogradov. "Two Types of Hot Luminiscence in Si/SiO<sub>2</sub> Superlattices". Physics Letters, A155, No.1, p.65-68, 1991.
48. E.A.Vinogradov, F.A.Pudonin, A.V.Zayats Optical spectroscopy of amorphous Si/SiO<sub>2</sub> quantum well structures. Proceedings of The Fifth Russia-Japan Seminar on Semiconductor Surfaces. Vladivostok, September 15-20, 2002 , p. 16-30.
49. E.A.Vinogradov, V.M.Farzdinov, A.L.Dobryakov, S.A.Kovalenko, Yu.E.Lofovik, 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.
50. E.A.Vinogradov, V.M.Farzdinov, A.L.Dobryakov, S.A.Kovalenko, Yu.E.Lofovik, and Yu.A.Matveets. Ultrafast Dynamics and Parametric Excitations of Microcavity Modes. Laser Physics, v.8 (3), p.620-624, 1998.
51. E.A.Виноградов, А.Л.Добряков, С.А.Коваленко, Ю.Е.Лозовик, Ю.А.Матвеец, В.М.Фарзтдинов. Фемтосекундная динамика поляритонов полупроводниковой (А<sup>2</sup>В<sup>6</sup>) микрополости. Известия Академии наук, серия физическая, т.63, № 6, стр. 1058-1068, 1999.
52. E.A.Vinogradov, A.L.Dobryakov, Yu.E.Lofovik, Yu.A.Matveets. "Femtosecond Photoresponse of Structures with the Schottky barrier". Laser Physics, v.11, No.11, 1147-1152, 2001.
53. 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.
54. 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.
55. 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.
56. E.A.Виноградов, В.В.Ефимов, А.В.Калмыков, Б.Н.Маврин, В.Ф.Минашкин, Н.Н.Новикова, В.В.Сиколенко, А.В.Скрыпник, С.И.Тютюнников, В.А.Яковлев. Оптические и структурные исследования PLZТ х/65/35 (х=4,8%) сегнетокерамики, облученной сильноточным импульсным пучком электронов. Письма в ЭЧАЯ, N 1[110], 39-47, 2002.
57. В.В.Ефимов, В.В.Иванов, Е.А.Клевцова, Н.Н.Новикова, В.В.Сиколенко, С.И.Тютюнников, Е.А.Виноградов, В.А.Яковлев. Оптические постоянные кристалла

- ТГС, облученного мощным импульсным пучком электронов. Письма в ЭЧАЯ, № [115], 65-71, 2002.
58. 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.
  59. 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.
  60. 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.
  61. 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.
  62. G.N.Zhizhin, V.A.Yakovlev. Broad-band spectroscopy of surface electromagnetic waves. Physics Reports, 1990, 194(5-6), 281-289.
  63. 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.
  64. Е.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.
  65. Е.В.Алиева, Г.Н.Жижин, В.А.Яковлев, В.А.Сычугов, 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.
  66. Е.В.Алиева, Э.Р.Элиел, Э.В.М.ван дер Хам, А.Ф.Г.ван дер Меер, Ю.Е.Петров, В.А.Сычугов, К.Х.Ф.Врехен, В.А.Яковлев. Гигантское усиление генерации суммарной частоты при возбуждении поверхностного плазмон-поляритона. Письма ЖЭТФ, 66(9), 581-584 (1997).
  67. E.W.M.van der Ham, Q.H.F.Vrehe, 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.
  68. 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.
  69. 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.
  70. 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.
  71. 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).
  72. 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.
  73. 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.
  74. 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.
  75. T.V. Dolgova, A. I. Maidikovski, 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.

76. 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.
77. N.I. Agladze, M.N. Popova. Hyperfine structure in optical spectra of LiYF<sub>4</sub>-Ho. *Solid State Commun.*, v.55, №12, p.1097-1100 (1985).
78. Н.И.Агладзе, Е.А.Виноградов, М.Н.Попова. Проявление квадрупольного сверхтонкого взаимодействия и взаимодействия между уровнями в оптическом спектре кристалла LiYF<sub>4</sub>-Ho. *ЖЭТФ*, т.91, вып.4(10), 1210-1218 (1986).
79. Н.И.Агладзе, Е.А.Виноградов, М.Н.Попова. Эффект заимствования интенсивности в оптическом спектре кристалла LiYF<sub>4</sub>-Ho. *Оптика и спектроскопия* т.61, 3-5 (1986).
80. 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 CsCdBr<sub>3</sub>:Pr<sup>3+</sup>. *Phys. Rev. B* 63, 075103-1–075103-1 (2001).
81. 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 LiYF<sub>4</sub>:Er<sup>3+</sup>. *Phys. Rev. B* 61, 7421–7427 (2000).
82. N.I. Agladze, M.N. Popova. Fine structure of hyperfine components in optical spectra of LiYF<sub>4</sub>-Ho. II<sup>nd</sup> International Symposium on Rare Earth Spectroscopy, Sept. 9-14, 1989, Changchung, China, Abstracts.
83. N.I. Agladze, M.N. Popova, G.N. Zhizhin, V.I. Egorov, M.A. Petrova. Isotope structure in optical spectra of LiYF<sub>4</sub>:Ho<sup>3+</sup>. *Phys. Rev. Lett.*, v.66, №4, p.477-480 (1991).
84. 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 <sup>6</sup>Li<sub>x</sub><sup>7</sup>Li<sub>1-x</sub>YF<sub>4</sub>:Ho<sup>3+</sup>. *ЖЭТФ*, т.104, вып.6(12), 4171-4193 (1993).
85. G.G. Chpurco, I.V. Paukov, M.N. Popova, Ja. Zoubkova. Spectral studies of magnetic cuprates R<sub>2</sub>Cu<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. *Sol.State Commun.*, v.79, №7, pp.569-572 (1991).
86. M.N. Popova. High-resolution spectroscopy of rare earth cuprates and nickelates. *Journ. of Alloys and Compounds* 275–277, 142–147 (1998).
87. 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<sub>3</sub>. *Phys. Rev. B*, v.57, 5040 (1998).
88. М.Н.Попова, А.Б.Сушков, А.Н.Васильев, М.Исобе, Ю.Уэда. Появление новых линий и изменение формы линий в ИК спектре монокристалла NaV<sub>2</sub>O<sub>5</sub> при спин-пайерлсовском переходе. *Письма в ЖЭТФ*, т.65, вып.9, 711-716 (1997).
89. М.Н.Попова. Инфракрасная спектроскопия новых спин-пайерлсовских соединений. *УФН*, т.169, №3, стр.353-355 (1999).
90. M.N. Popova, A.B. Sushkov, S.A. Klimin, E.P. Chukalina, B.Z. Malkin, M. Isobe, Yu. Ueda. Lattice vibrations of •'-NaV<sub>2</sub>O<sub>5</sub> in the low-temperature phase: An alternative interpretation to magnetic bound states. *Phys. Rev. B* 65 144303-1–144303-14 (2002).
91. М.Н.Попова, А.Б.Сушков, Е.П.Чукалина, Е.А.Романов, М.Исобе, Ю.Уэда. Зарядовое упорядочение и димеризация решетки в •'-NaV<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Один или два фазовых перехода? *Физика твердого тела* 44, N8, 1390-1394 (2002).
92. 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<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. <sup>+</sup>, *Phys. Rev. B* 59, 14546–14551 (1999).
93. 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<sup>3+</sup> crystal-field levels and magnetic ordering in (Er<sub>x</sub>Y<sub>1-x</sub>)<sub>2</sub>BaNiO<sub>5</sub> chain compounds. *Subm. to Phys. Rev. B*.



## ОТДЕЛ ЛАЗЕРНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ



Начало отделу лазерной спектроскопии было положено организацией 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”.

За основу научной программы лабораторий были положены оригинальные идеи по новым методам лазерной спектроскопии и селективному воздействию лазерным излучением 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.Матвеец), 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. – 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.

Первые эксперименты (1971-1972 гг.) были связаны с разработкой в 1971-1974 гг. методов лазерной спектроскопии без доплеровского уширения (О.Н.Компанец, Б.Д.Павлик), разработкой методов резонансного преобразования ИК лазерного излучения при

возбуждении колебательно-вращательных переходов молекул (О.А.Туманов, В.И.Балыкин, Е.А.Рябов и др.).

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 осуществлена впервые резонансная ступенчатая ионизация на примере атомов Rb [2, 3]. С тех пор и по настоящее время, этот метод в разных схемах ступенчатой ионизации (рис. 01), в разных вариантах разрабатывается в лаборатории для решения многих задач: детектирование одиночных атомов, детектирование очень редких изотопов, детектирование короткоживущих ядер на ускорителе, разделение изотопов, ядерных изобар и ядерных изомеров, получение чистых фотоионных пучков и т.д.

**ЛАЗЕРНЫЙ ФОТОИОНИЗАЦИОННЫЙ СПЕКТРОМЕТР  
ДЛЯ УЛЬТРАЧУВСТВИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА СЛЕДОВ**

/ ИНСТИТУТ СПЕКТРОСКОПИИ АН СССР /

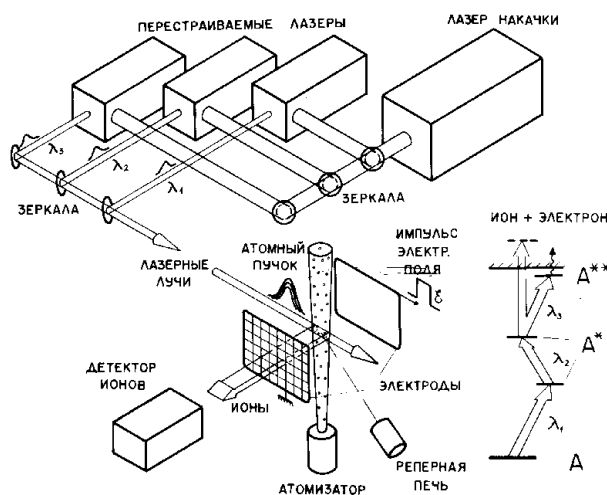


Рис.01

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

На рис.02 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.12а, был использован в осуществленном в 1977 г. эксперименте по резонансно-ионизационному детектированию 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] и, совместно с ГЕОХИ АН СССР обнаружению родиевой аномалии на границе третичного периодов (65 млн. лет тому назад) [5б], эксперименте (рис. 12б) по измерению ридберговских состояний и потенциала ионизации атома Fr в образце, содержащем всего  $10^5$  атомов.

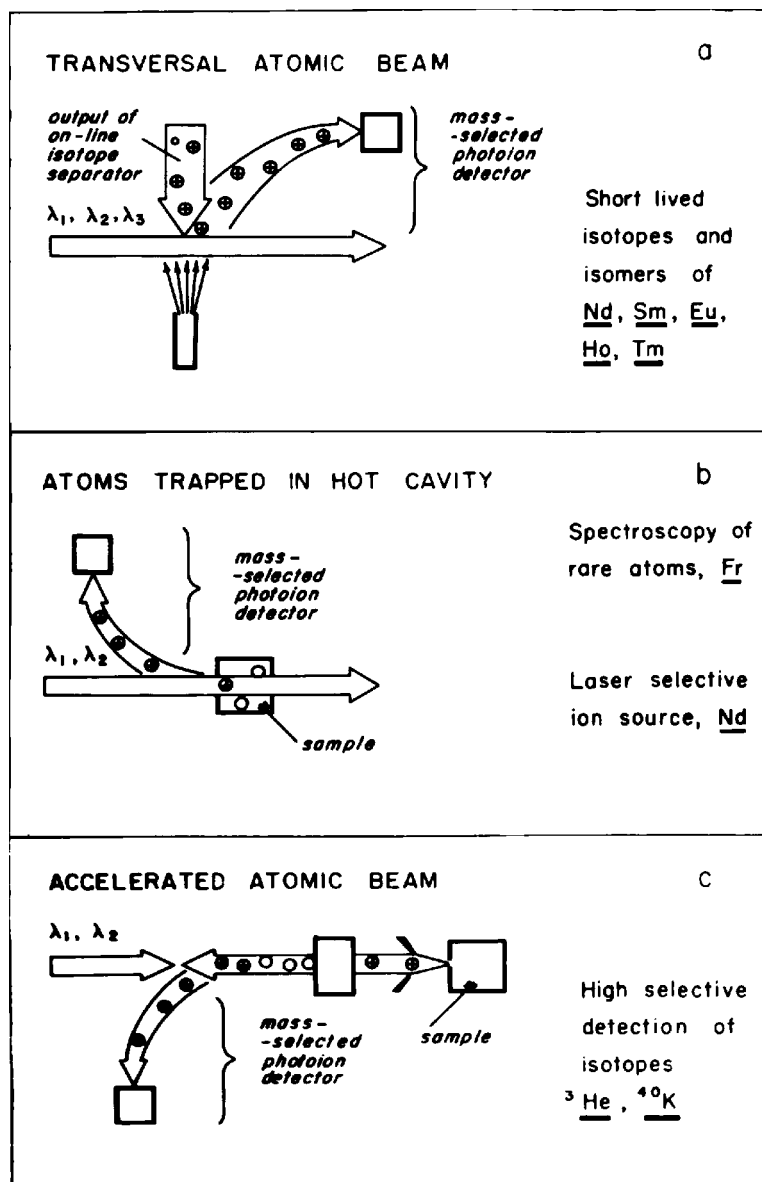


Рис. 02

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

Метод резонансной ионизации в сочетании с идеей электростатического ускорения атомов (в виде ионов) в пучке (рис02с) 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. 03 показаны результаты первого эксперимента по лазерному детектированию атома  $^3\text{He}$  [8].

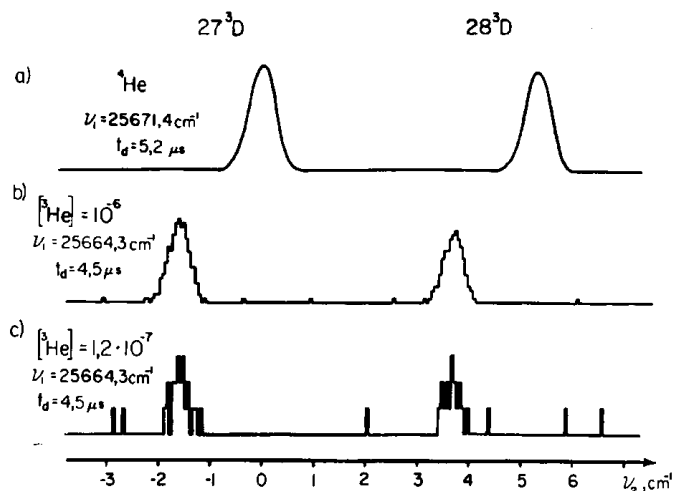


Рис.03

Детектирование редкого изотопа  $^3\text{He}$  в пучке ускоренных атомов He. Представлена зависимость ионного сигнала от частоты лазера на второй ступени резонансного возбуждения метастабильных атомов  $^4\text{He}$  и  $^3\text{He}$  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 было впервые осуществлено оптическое разделение ядерных изомеров. На рис.04 показаны результаты первого такого эксперимента [9] с изомерными ядрами  $^{141}\text{Sm}$  и  $^{164}\text{Tm}$ . 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], сейчас используется во многих экспериментах в ядерной физике и воспроизводится в ядерных лабораториях Японии, Канады и др. На рис.05 показана схема лазерного ионного источника в ЦЕРН, созданного совместно с Институтом спектроскопии, для широкого класса экспериментов методами  $A^+$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  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.

Начиная с 1976 г., стали разрабатываться идеи управления (охлаждения, пленения) движением атомов с помощью лазерного излучения. После первых теоретических работ [12] последовали первые успешные эксперименты по замедлению и охлаждению атомов в пучке

[13], коллимации [14], фокусировке [15], каналирование [16а] и наконец, отражению атомного пучка от градиента светового поля [16б] (рис.06).

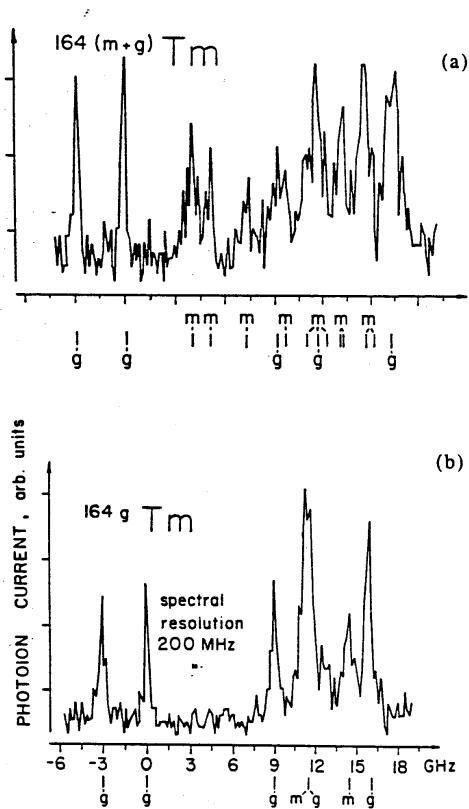


Рис.04

Спектр резонансной фотоионизации (переход  $4f^{13}6s^27F_{7/2} - 4f^{12}5d6s^2(6,7/2)_{7/2}$  на 589,6 нм) изотопа  $^{164}Tm$  в: а) основном и изомерном состоянии ядра, б) основном состоянии ядра.

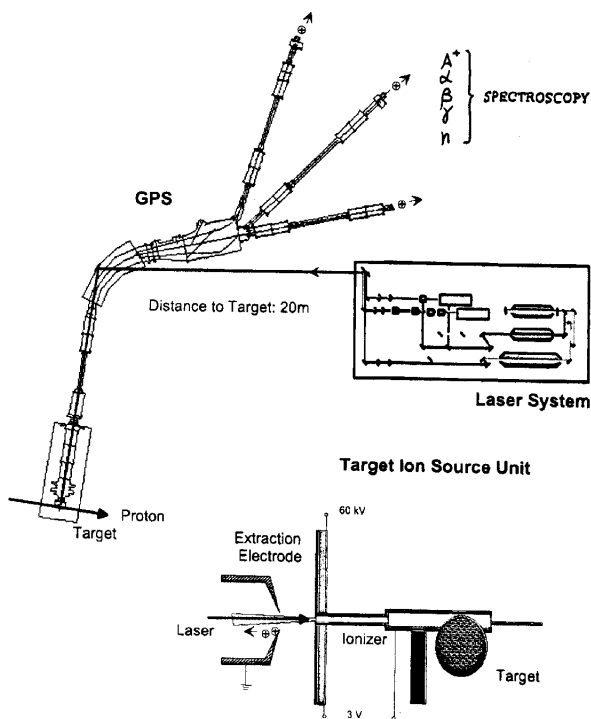
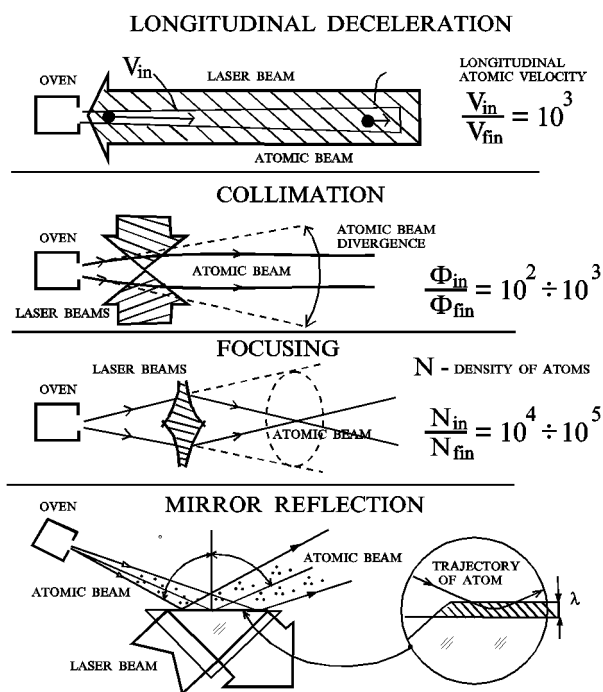


Рис.05

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

## Laser Control of Atomic Beams

### Basic Methods



Atom Guiding, Reflective Cooling etc

Рис.06

Различные методы лазерного управления пучком атомов, впервые осуществленные в Институте спектроскопии.

На рис.07 показаны результаты эксперимента по первому в мире [13b] лазерному охлаждению пучка атомов. Температура пучка атомов Na уменьшена от начальной температуры 600 К до 1,5 К (группа В.И.Балыкина). При продольном охлаждении атомов увеличивается их поперечная скорость вследствие флуктационного 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 [14]. 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  $T_{min} = h\gamma/k_B$  ( $h$  – постоянная Планка,  $2\gamma$  – однородная ширина линии поглощения атомов,  $k_B$  – постоянная Больцмана).



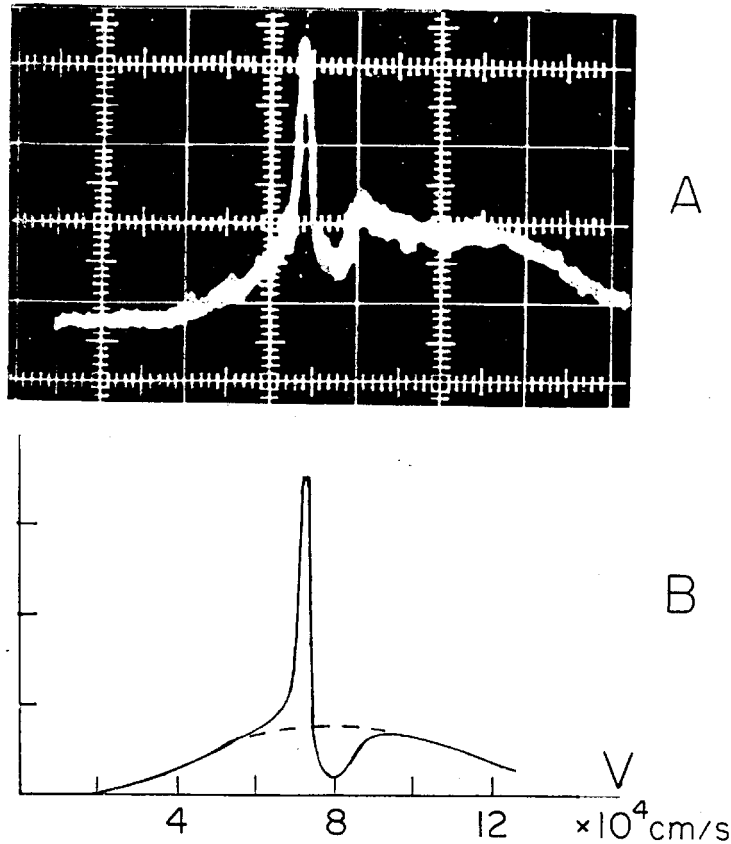


Рис.07

Лазерное охлаждение до 1,5 К (замедление и монохроматизация) пучка атомов Na встречным лазерным лучом (А — эксперимент, В — расчет).

Выражение для квантового предела охлаждения атомов впервые получил В.Г.Миногин и др. еще в работе 1977 г. [12a]. 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 мкК – 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. 08.

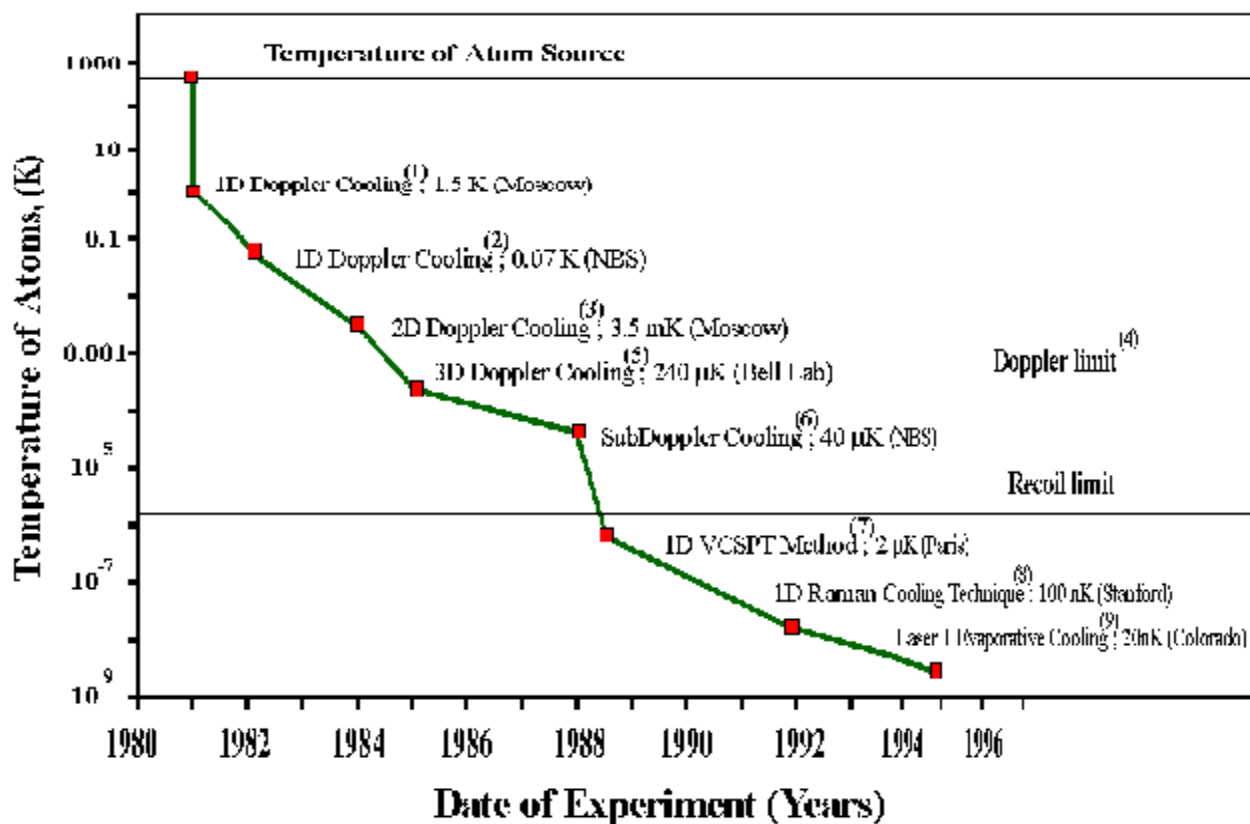


Рис.08

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

В результате исследований по воздействию сил светового давления лазерного излучения на поступательные движения атомов в середине 80-ых 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 [17-21].

Одним из перспективных применений атомной оптики является атомная нанолитография – создание структур с размерами в области 10 нм. Важным шагом на пути атомной нанолитографии является создание атомных ансамблей (пучков) с высокой фазовой плотностью. Рис. 09 иллюстрирует прогресс в достижении максимальных потоков холодных атомов, полученных методами лазерного охлаждения в Институте Спектроскопии и в других научных центрах.

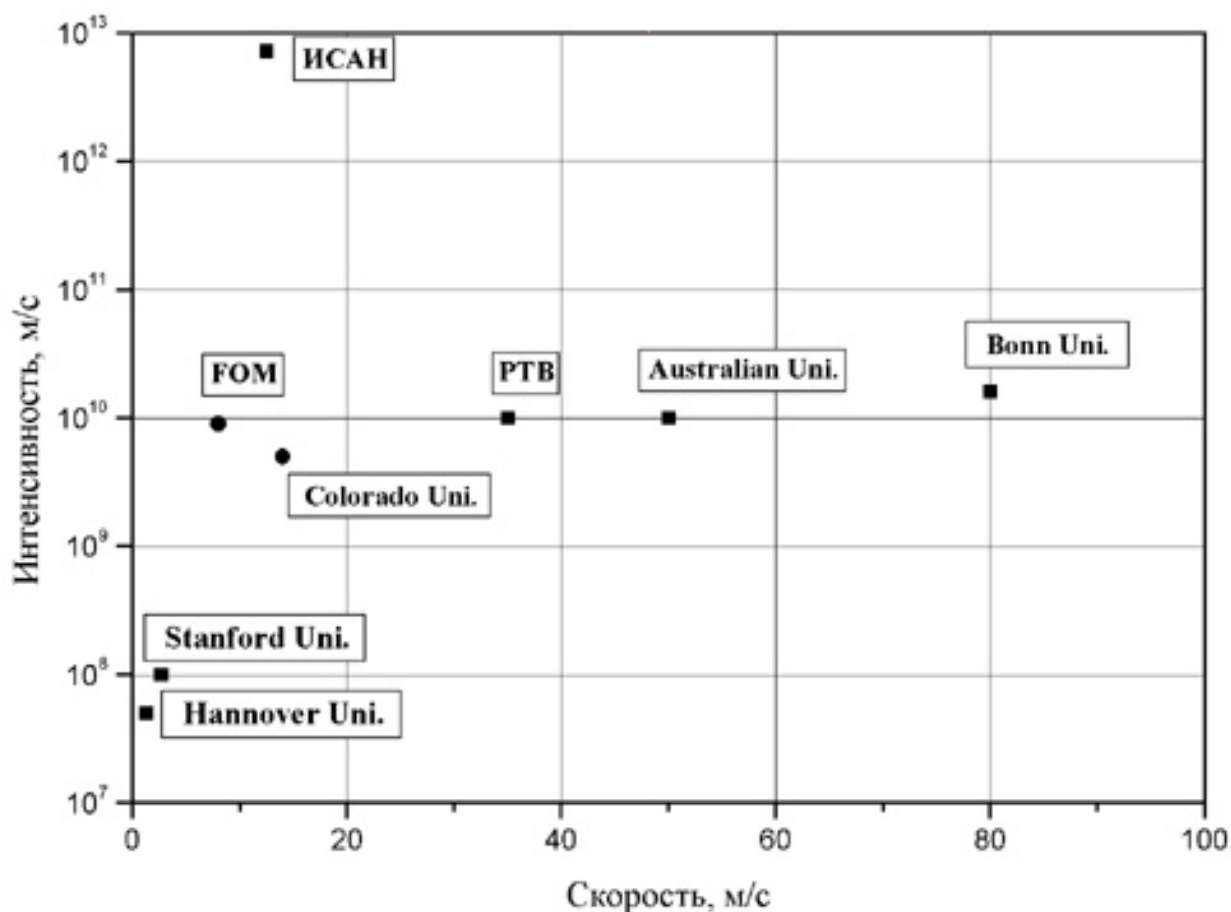


Рис. 09

Рисунок иллюстрирует прогресс в достижении максимальных потоков холодных атомов, полученных методами лазерного охлаждения в различных научных центрах. [1] M. Schiffer *et al.* *Phys. Rev. A*, 61, 013405; [2] K. Dieckmann *et al.* *Phys. Rev. A* 58, 3891; [3] ЖЭТФ 2003 г. (в печати); [4] Z. T. Lu *et al.* *PRL* 77, 3331; [5] A. Witte *et al.* *J.O.S.A. B*, 9, 1030; [6] M. D. Hoogerland *et al.* *Aust. J. Phys.*, 49, 567; [7] F. Lison *et al.* *Phys. Rev. A*, 61, 013405.

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.

Среди других ранних работ следует упомянуть выполненный в 1976 г., совместно с лабораторией атомной спектроскопии, эксперимент [22] 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 новым типам экзотических лазеров, такие 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  $\gamma$ -переходах с лазерным разделением изомерных ядер (д.ф.-м.н. В.С.Летохов, 1971-1973 гг.).

Ретроспективно можно сказать, что главным стержнем работы лаборатории лазерной спектроскопии в течение 33 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.

Если проблемы 1-4 в значительной мере решены и уже происходит очень успешная эксплуатация разработанных методов, то проблема 5 находится в стадии поиска и демонстрации соответствующих методов. Это предопределяет дальнейшие направления исследований лаборатории на ближайшие годы. По-существу, решая эту проблему мы переходим в область так называемой, *нанооптики*. Нанооптика – это новое направление в физике, основанное на наблюдении и использовании новых эффектов взаимодействия (линейного и нелинейного) лазерного излучения с материалами (атомы, молекулы, поверхность и т.д.) в пространственных масштабах, гораздо меньше длины волны света. Обычно считалось, что такая постановка не имеет смысла, т.к. лазерный свет нельзя локализовать (например, сфокусировать) в пространстве с размерами, меньшими длины волны света. В действительности, при использовании субмикронных структур и даже наноструктур, свет можно ограничивать в меньших объемах, подобно тому, как это можно осуществлять с СВЧ излучением. Однако, в отличие от СВЧ, в оптическом случае становится существенно атомно-молекулярная (дискретная) структура, квантовые свойства вещества, взаимодействующего с таким локализованным светом. Отсюда возникают две новых возможности:

- во-первых, использование сильно локализованного лазерного излучения позволяет исследовать структуру вещества с нанометровым пространственным разрешением;
- во-вторых, оптический отклик вещества на локализованный свет существенно изменяется по сравнению со случаем его взаимодействия с распространяющимся световым полем.

Исследование этих возможностей атомной и квантовой нанооптики является основной задачей лаборатории лазерной спектроскопии. Они имеют, по крайней мере, два потенциально важных практических применения: 1) лазерная спектромикроскопия вещества с нанометровым пространственным разрешением и химической селективностью и 2) оптическая память ультравысокой плотности (порядка 100 Гб на см<sup>2</sup>).

Основные разрабатываемые в настоящее время направления:

### **I. Нанооптика**

1) *Лазерная резонансная фотоэлектронная микроскопия* с пространственным разрешением 3-30 нм [23]. Создание микроскопа с возбуждением лазерными, в том числе, фемтосекундными импульсами, который позволяет исследовать и выбирать оптические волоконные иглы с единственным возбуждаемым резонансным центром для дальнейшего использования в качестве наносенсора молекулярных структур, поверхности и т.д. [24]. Этот же микроскоп используется для экспериментов по исследованию возможности создания WROM с ультравысокой плотностью записи и чтения информации [25, 26];

2) *Лазерная микроскопия ближнего поля* с поперечным разрешением около 30 нм и продольным разрешением лучше 1 нм. В отличие от существующих вариантов микроскопии ближнего поля, в созданном микроскопе осуществляется точное измерение расстояния от поверхности наноиголки до исследуемой поверхности [26]. Это позволяет исследовать процессы резонансного взаимодействия молекул (резонансной передачи энергии [23, 24]), как функции расстояния между ними. Это в свою очередь, дает основу для реализации упомянутого лазерного микроскопа с нанометровым пространственным разрешением и спектральной (химической) селективностью. Такого типа микроскоп откроет совершенно новые инструментальные возможности для nanoscience and nanotechnology;

3) *Изменение оптических характеристик материалов* (атомов, молекул) в наномасштабе, т.е. вблизи и внутри наноструктур. Теоретически изучается изменение резонансных частот, вероятности радиационных переходов атомов [31], диполь-дипольного взаимодействия молекул [32], что позволяет индуцировать нанолокальные модификации свойств материалов для многочисленных применений (микроскопия [27, 28], оптическая память и т.д.).

### **II. Атомная оптика**

Это новый тип оптик (наряду с фотонной, электронной и нейтронной оптикой), которая возникла в последние годы в результате исследований по взаимодействию электромагнитного излучения на пространственное движение атомов. К кругу исследуемых физических вопросов [17-21, 36] 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. Развитие методов атомной оптики открывают путь к литографии с атомным разрешением.

### **III. Атомная нанооптика**

Из общих физических соображений ясно, что использование пространственно локализованных потенциалов является более предпочтительным для построения элементов атомной оптики. Исследуется возможность применения лазерных нанополей для задач атомной оптики – атомной нанооптики [37].

Дополнительным направлением исследований стало объяснение аномальных спектральных эффектов в окрестности самой массивной яркой звезды нашей Галактики – *h Carinae*, которые, начиная с 2002 г. проводит проф. В.С.Летохов совместно с Лундским

Университетом (Швеция, проф. S. Johansson) [32], которые привели к открытию астрофизического лазера [33, 34].

За прошедшие годы, в лаборатории подготовлено и защищено две докторских, более тридцати кандидатских диссертаций.

На основании выполненных исследований опубликовано девять монографий.

### Монографии лаборатории лазерной спектроскопии

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 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.Мионогин, 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).

### 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 photionizaiton. 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 photoionizaion spectrscopy and laser separation of  $^{141}\text{Sm}$  and  $^{164}\text{Tm}$  nuclear isomers. Opt. Comm. 61, 383 (1987).
10. (a) G.P.Alkhozov 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).
11. В.И.Балыкин и др. а) Лазерное флуоресцентное детектирование единичных атомов. Письма в ЖЭТФ, 26, 492 (1977); ЖЭТФ, 77, 2221 (1979); б) Multiphotoelectron fluorescence selective detection of single atoms by laser radiation. Appl. Phys. 22, 245 (1980).



12. (a) 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); *ЖЭТФ*, 72 1328 (1977); (b) V.S.Letokhov and B.D.Pavlik. Spectral Ione Narrowing in Gas by Atoms Trapped in a Standing Light Wave. *Appl. Phys.* 9, 229 (1976).
13. а) 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); б) С.В.Андреев, В.И.Балыкин, В.С.Летохов, В.Г.Миногин. Радиационное замедление до 1.5 К и монохроматизация пучка атомов Na встречным лазерным лучом. *Письма в ЖЭТФ*, 34, 463 (1981); *ЖЭТФ*, 82, 1429 (1982).
14. В.И.Балыкин и др. Радиационная коллимация атомного пучка, путем двухмерного охлаждения лазерным излучением. *Письма в ЖЭТФ* 40, 251 (1984); *JOSA*, B2, 1776 (1985).
15. В.И.Балыкин и др. Фокусировка атомного пучка диссипативной силой светового давления лазерного излучения. *Письма в ЖЭТФ* 43, 172 (1986); В.И.Балыкин и др. Глубокая фокусировка атомного пучка. *Письма в ЖЭТФ* 59, 219 (1994).
16. а) V.I.Balykin et al. Channeling of atoms in a standing spherical wave. *Opt. Letters* 13, 958 (1988); б) В.И.Балыкин и др. Отражение светового пучка от градиента светового поля. *Письма в ЖЭТФ*, 45, 282 (1987); *Phys. Rev. Lett.* 60, 2137 (1988);
17. V.I.Balykin, V.S.Letokhov. *Phys. Today* 4, 23 (1989).
18. V.I.Balykin, V.S.Letokhov. "Atom Optics with Laser Light", *Laser Science and Technology*, Vol. 18, Harwood Academic Publ., Australia et al. (1985).
19. V.I.Balykin. *Advances in Atomic, Molecular and Optical Physics*. Vol. 41, 181 (1999).
20. V.I.Balykin, V.G.Minogin, V.S.Letokhov. *Rep. Prog. Phys.* 63, 1429 (2000).
21. V.Minogin et al. *Phys. Reports* (to be published).
22. А.Н.Жерихин и др. Об усилении в области дальнего вакуумного ультрафиолета на переходах многозарядных ионов. *Квантовая электроника*, 3, 152 (1976).
23. а) В.С.Летохов. Использование лазерного излучения в автоэлектронной и автоионной микроскопии для наблюдения биомолекул. *Квантовая электроника*, 2, 930 (1975); б) V.N.Konopsky, S.K.Sekatskii, V.S.Letokhov. Laser Resonance Photoelectron Microscopy with a Subwavelength High Spatial Resolution: the First Observation of Single Color-Centers of Surface. *Optics Comm.*, 13, 251 (1966).
24. С.К.Секацкий, В.С.Летохов. Сканирующая оптическая микроскопия с нанометровым пространственным разрешением на основе резонансного возбуждения флуоресценции от единственного возбужденного центра. *Письма в ЖЭТФ*, 63, 311 (1966).
25. V.S.Letokhov, S.K.Sekatskii. On the Possibility of Ultra-High Density WROM Based on the Using of Laser and Corpuscular Beams. *Optics Comm.* 147, N1-3, 19-25 (1998).
26. Д.А.Лапшин, В.Н.Решетов, С.К.Секацкий, В.С.Летохов. Контактная сканирующая оптическая микроскопия ближнего поля. *Письма в ЖЭТФ*, 67, N4, 245-250 (1998).
27. S.K.Sekatskii, G.T.Shubeita, M.Chergui, G.Dietler, B.N.Mironov, D.A.Lapshin, V.S.Letokhov. Towards the Fluorescence Resonance Energy Transfer (FRET) Scanning Near-Field Optical Microscopy: Investigation of Nanolocal FRET Processes and FRET Probe Microscope. *Zh. Eksp. Teor. Fiz.* 117, 885-894 (2000); *J. Exp. Teor. Phys.* 90, 769-777 (2000).
28. G.T.Shubeita, S.K.Sekatskii, G.Dietler, V.S.Letokhov. Local Fluorescent Probes for the Fluorescence Resonance Energy Transfer Scanning Near-Field Optical Microscopy. *Appl. Phys. Lett.* 80, 2625-2627 (2002).
29. V.V.Klimov, V.S.Letokhov. Quadrupole Radiation of the Atom in the Vicinity of Dielectric Microsphere. *Phys. Rev.* A54, 4408 (1996).
30. V.V.Klimov, V.S.Letokhov. Resonance Energy Exchange at Nanoscale Curved Interface. *Chem. Phys. Lett.* 285, 313-320 (1998).
31. V.V.Klimov, M.Ducloy, V.S.Letokhov. A Model of an Apertureless Near-Field Scanning Microscope with a Prolate Nanospheroid as a Tip and Excited Molecule as an Object. *Chem. Phys. Lett.* 358, 192-198 (2002).
32. S.Johansson, V.S.Letokhov. Mysterious UV Lines of FeII from  $\eta$  Car Blobs. In: *Eta Carinae and Other Mysterious Stars*. T.Gull, S.Johansson, K.Davidson (Eds.), ASP Conf. Series, vol. 242, 297-308 (2001).
33. S.Johansson and V.S.Letokhov. Laser Action in Space: 1  $\mu$ m Lines of FeII in Gaseous Condensations in the Vicinity of  $\eta$  Car. *Pis'ma ZhETF* 75, 591-594 (2002);
34. 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).
35. V.V.Klimov, V.S.Letokhov. *Opt. Commun.* 121, 130 (1995).
36. В.И.Балыкин, В.В.Климов, В.С.Летохов. *Письма в ЖЭТФ* 59, 219 (1994).
37. В.И.Балыкин, В.С.Летохов, В.В.Климов. *Письма в ЖЭТФ* 78(1), 11-15 (2003) ; [*JETPLett*, 78(01), 8-12(2003)]

## 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 (2003 г.) в постоянном штате состоит десять научных сотрудников, кроме того в ней обычно работает несколько студентов и аспирантов.

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  $\text{NH}_3$  (Р.В.Амбарцумян, В.С.Летохов, Г.Н.Макаров, А.А.Пурецкий, 1972 г.) [1].

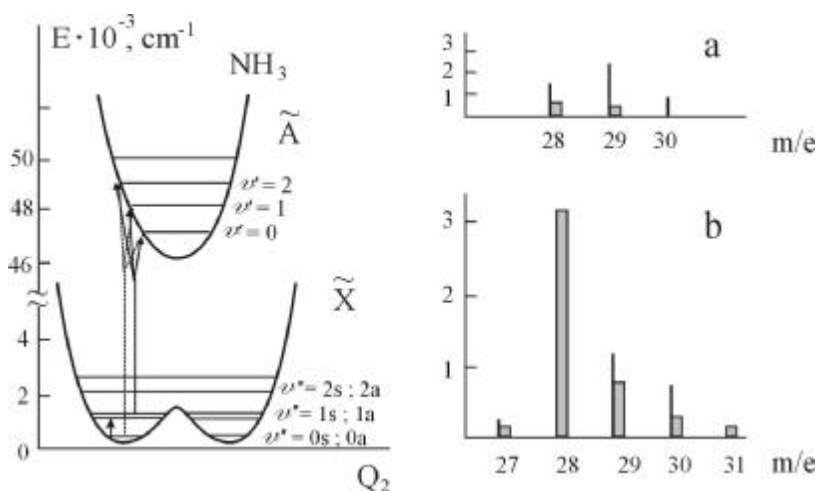


Рис. 1.

Слева: схема изотопически-селективной двухступенчатой фотодиссоциации молекул аммиака. Селективно возбужденные ИК лазерным излучением молекулы диссоциируются УФ излучением. Справа: результаты по лазерному разделению изотопов азота. Масс-спектры  $\text{N}_2$  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. Заштрихованные линии соответствуют масс-спектрам смеси до облучения (фоновые линии).

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  $\text{SF}_6$  [3].

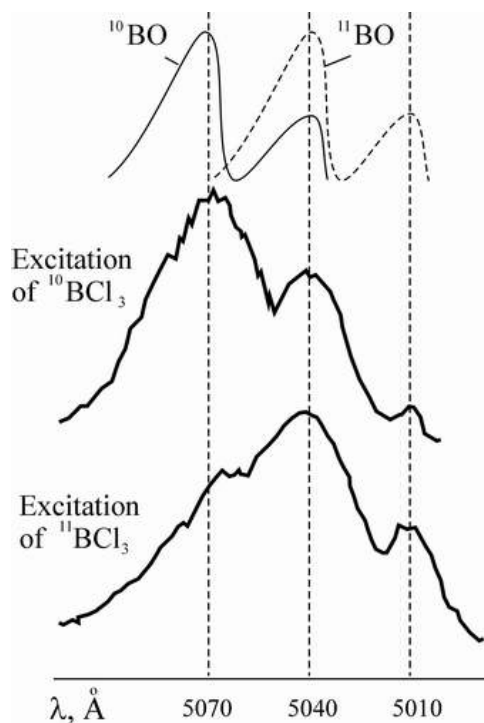


Рис. 2.

Наблюдение изотопической селективности ИК МФД диссоциации молекул: хемилюминесценция радикала  $\text{BO}^*$  при облучении  $\text{CO}_2$ -лазером смеси  $^{10}\text{BCl}_3$  и  $^{11}\text{BCl}_3$  в присутствии кислорода. Вверху приведены модельные спектры радикалов  $^{10}\text{BO}$  и  $^{11}\text{BO}$  в отдельности.

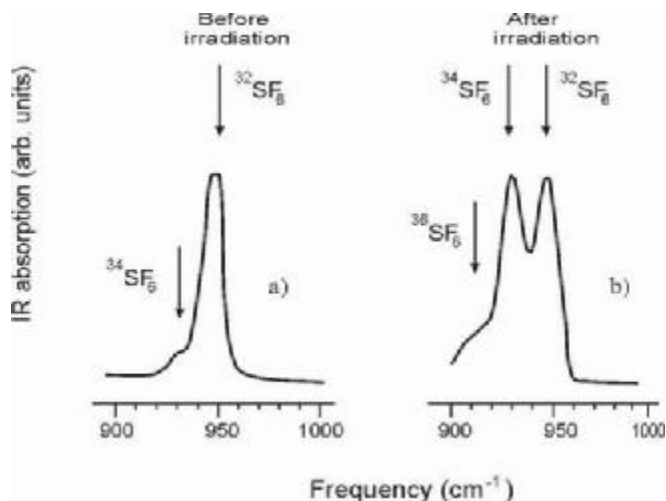


Рис. 3.

Обогащение газа  $\text{SF}_6$  изотопами  $^{34}\text{SF}_6$  и  $^{36}\text{SF}_6$  за счет ИК МФД молекул  $^{32}\text{SF}_6$  излучением  $\text{CO}_2$ -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 это процесса. Полученные результаты отражены в ряде монографий и обзоров [4-8]. 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  $\text{CF}_2\text{HCl}$  излучением импульсного  $\text{CO}_2$ -лазера. Используя эту технологию, в компании «Газ-Ойл» (г. Калининград) был создан опытный завод по производству углерода  $^{13}\text{C}$  [9]. Блок-схема одного из модулей этого завода приведена на рис. 4.

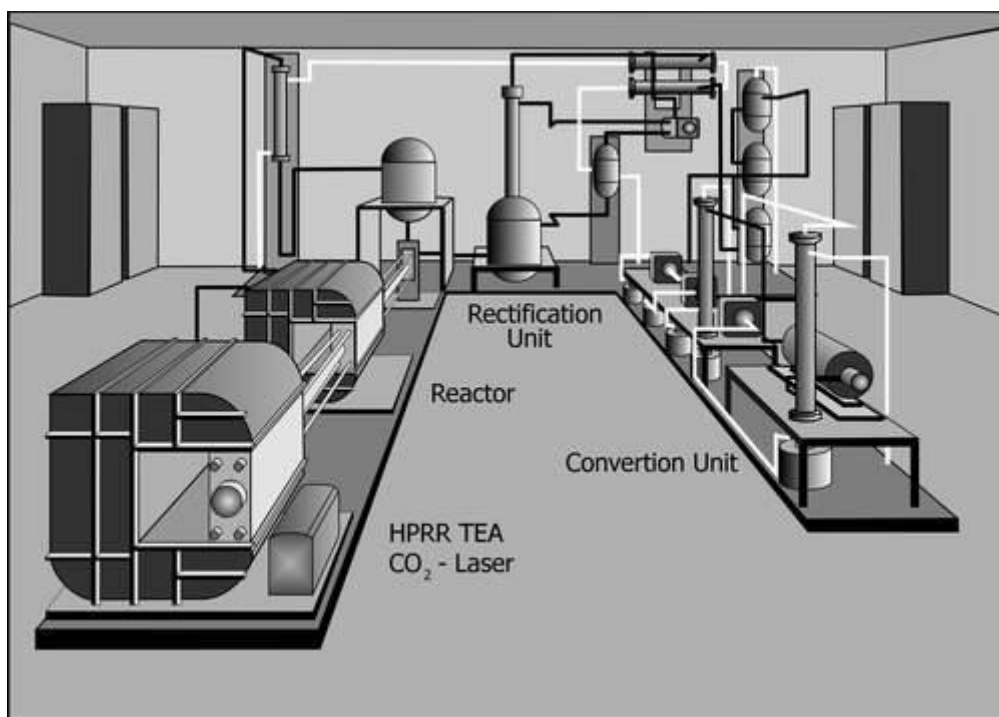


Рис. 4.

Блок-схема одного из модулей завода по лазерному разделению изотопов углерода. Модуль состоит из импульсно-периодического  $\text{CO}_2$ -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  $^{13}\text{C}$  с обогащением от природного содержания 1,108% до 40÷50%. При необходимости, дальнейшее обогащение до 99% возможно как традиционными методами, так и на основе второй ступени лазерного разделения. В настоящее время в рамках этой программы ведутся работы по совершенствованию существующей технологии и разработке процесса разделения изотопов других элементов (к.ф.-м.н. В.Б.Лаптев и другие).

Наряду с исследованием изотопически селективного ИК МФ возбуждения и диссоциации молекул, в лаборатории 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 [10]. Некоторые итоги этих исследований были подведены в коллективных монографиях [11, 12].

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 [13].

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 [14, 15]. 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 ( $\sim 15\ 000\ \text{см}^{-1}$ )  $\text{SF}_6$  [16], изучена кинетика мономолекулярного распада ряда молекул и скоростное распределение образующихся радикалов [16, 17].

## 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 другие) [18]. В настоящее время исследуется изотопическая селективность ИК МФД в условиях газодинамического охлаждения в молекулярных пучках [17], в том числе, при взаимодействии пучков с твердой поверхностью [19]. 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 и др.).

Методами спектроскопии КР исследовалось перераспределение 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 (рис. 5) и впервые измерены ее значения для ряда молекул (Глава 2 в [11, 12] и [20]).

Было обнаружено также [21], 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 [22]. Дана теоретическая интерпретация этого эффекта (д.ф.-м.н. А.А.Макаров) [22].

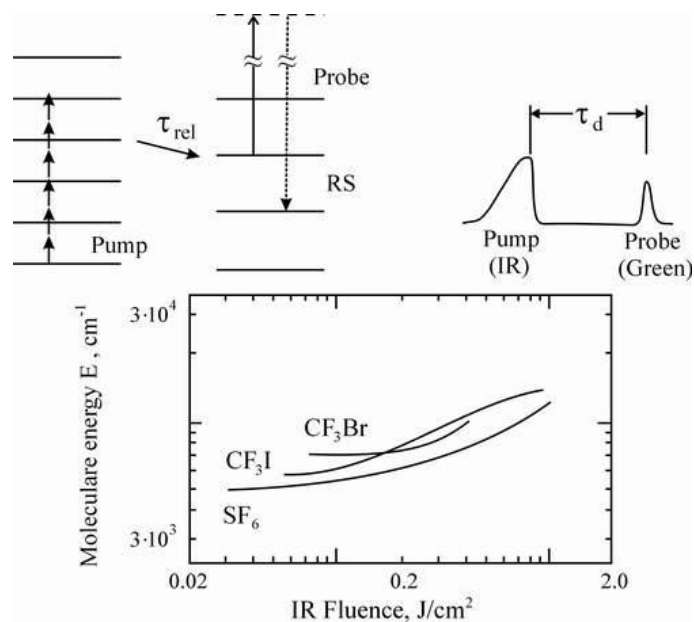


Рис. 5.

Исследование стохастизации колебательной энергии в многоатомных молекулах. Вверху – методика КР зондирования с временным разрешением. Внизу – средняя энергия «стохастизированных» молекул  $E$  как функция накачки. Выход на стационарное значение  $E$  при малых накачках соответствует границе стохастизации

#### 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 (д.ф.-м.н. А.А.Макаров и др.) теория расчета спектров колебательных переходов в многоатомных молекулах, когда доминирующую роль играет статистическое неоднородное уширение [23]. Выполненные измерения показали ее хорошее согласие с экспериментом [24, 25]. Разработана методика и на примере молекулы  $SF_6$  впервые определена величина однородного уширения в широком диапазоне энергий [26]. На основании этих результатов разработана теоретическая модель, на количественном уровне описывающая процесс ИК МФ возбуждения и диссоциации [16].

В настоящее время фундаментальные исследования ведутся по следующим основным направлениям:

- Изучение внутримолекулярной динамики с использованием методов пикосекундной лазерной спектроскопии. В дальнейшем планируется переход к использованию импульсов фемтосекундной длительности.
- Спектроскопия молекулярных кластеров, включая исследование многофотонных процессов, индуцированных УФ и ИК лазерным излучением.



- Взаимодействие пучков колебательно возбужденных молекул с холодной поверхностью.

Кроме того, в связи с разработкой перестраиваемых источников излучения пико- и фемтосекундной длительности в среднем ИК диапазоне, ведутся исследования оптических и нелинейных свойств нелинейных кристаллов из семейства халькогенидов.

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

На основании выполненных исследований опубликовано пять монографий.

### **Монографии лаборатории спектроскопии возбужденных состояний молекул**

1. 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.
2. Е.П.Велихов, В.Ю.Баранов, В.С.Летохов, Е.А.Рябов, А.П.Старостин. «Импульсные CO<sub>2</sub> лазеры и их применение для разделения изотопов», Наука, Москва, 1983.
3. V.N.Bagratashvili, V.S.Letokhov, A.A.Makarov, E.A.Ryabov. “Multiple photon infrared laser photophysics and photochemistry”. Harwood Acad. Publ., Chur, 1985.
4. “Laser spectroscopy of highly vibrationally excited molecules”, ed. By V.S. Letokhov, Adam-Hilger, Bristol, 1989.
5. “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. 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).
5. Е.П.Велихов, В.Ю.Баранов, В.С.Летохов, Е.А.Рябов, А.П.Старостин. «Импульсные CO<sub>2</sub> лазеры и их применение для разделения изотопов», Наука, Москва, (1983).
6. V.N.Bagratashvili, V.S.Letokhov, A.A.Makarov, E.A.Ryabov. “Multiple photon infrared laser photophysics and photochemistry”. Harwood Acad. Publ., Chur, (1985).
7. В.С.Летохов, Е.А.Рябов. Глава 7.3 в: «Изотопы». Под ред. В.Ю.Баранова, ИзДАТ, Москва, (2000).
8. V.S.Letokhov, E.A.Ryabov. “Laser Isotope Separation” in “Optics Encyclopedia”, Wiley-VCH, Berlin, (2003).
9. 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).
10. В.Н.Баграташвили, С.И.Ионов, В.С.Летохов, В.Н.Лохман, Г.Н.Макаров, А.А.Стучебрюхов. Письма в ЖЭТФ **44**, 450 (1986).

11. "Laser spectroscopy of highly vibrationally excited molecules", ed. By V.S. Letokhov, Adam-Hilger, Bristol, 1989.
12. Лазерная спектроскопия колебательно-возбужденных молекул. Под ред. В.С.Летохова. Наука, Москва, 1990.
13. Ю.А.Курицын, Г.Н.Макаров, И.Пак. М.В.Сотников. ЖЭТФ **94**, 65 (1988).
14. В.Н.Апатин, Г.Н.Макаров, В.В.Нестеров. Письма в ЖЭТФ **73**, 735 (2001).
15. Г.Н.Макаров. УФН **173**, №9 (2003).
16. V.N.Lokhman, A.A.Makarov, D.D.Ogurok, E.A.Ryabov, V.S.Letokhov. Chem. Phys. **286**, 385 (2003).
17. V.N.Lokhman, D.D.Ogurok, E.A.Ryabov. Chem. Phys. **271**, 357 (2001).
18. A.V.Evseev, V.S.Letokhov, A.A.Puretzky. Appl. Phys. **36B**, №2, 93 (1985).
19. Г.Н.Макаров, А.Н.Петин. ЖЭТФ **119**, 5 (2000).
20. A.L.Malinovsky, V.S.Letokhov, E.A.Ryabov. Chem. Phys. **139**, №1, 229 (1989).
21. А.А.Костерев, А.Л.Малиновский, Е.А.Рябов. Письма в ЖЭТФ **54**, 16 (1991).
22. А.А.Kosterev, А.А.Makarov, А.L.Malinovsky, Е.А.Ryabov. Chem. Phys. **219**, 305 (1997).
23. А.А.Makarov, I.Yu.Petrova, Е.А.Ryabov, V.S.Letokhov. J. Phys. Chem. **102**, 1438 (1998).
24. A.L.Malinovsky, I.Yu.Petrova, A.A.Makarov, E.A.Ryabov, V.S.Letokhov. J. Phys. Chem. **102A**, 9353 (1998).
25. А.А.Kosterev, А.А.Makarov, А.L.Malinovsky, I.Yu.Petrova, Е.А.Ryabov, V.S.Letokhov. J. Phys. Chem. **104A**, 10259 (2000).
26. V.N.Lokhman, A.A.Makarov, I.Yu.Petrova, E.A.Ryabov, V.S.Letokhov. J. Phys. Chem. **103A**, 11299 (1999).

## Лаборатория спектроскопии ультрабыстрых процессов



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 5 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.

Создание лазеров, составляющих основу таких установок, потребовало проведения специальных исследований физики генерации и усиления ультракоротких импульсов. Наиболее важным результатом, полученным в лаборатории в этом направлении, 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 безинерционному 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.

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 [12,13]. Важным результатом этих исследований явилось обнаруженное **снижение порога фотоотрыва иона при переходе к длительностям меньше пикосекунды** (рис.1).

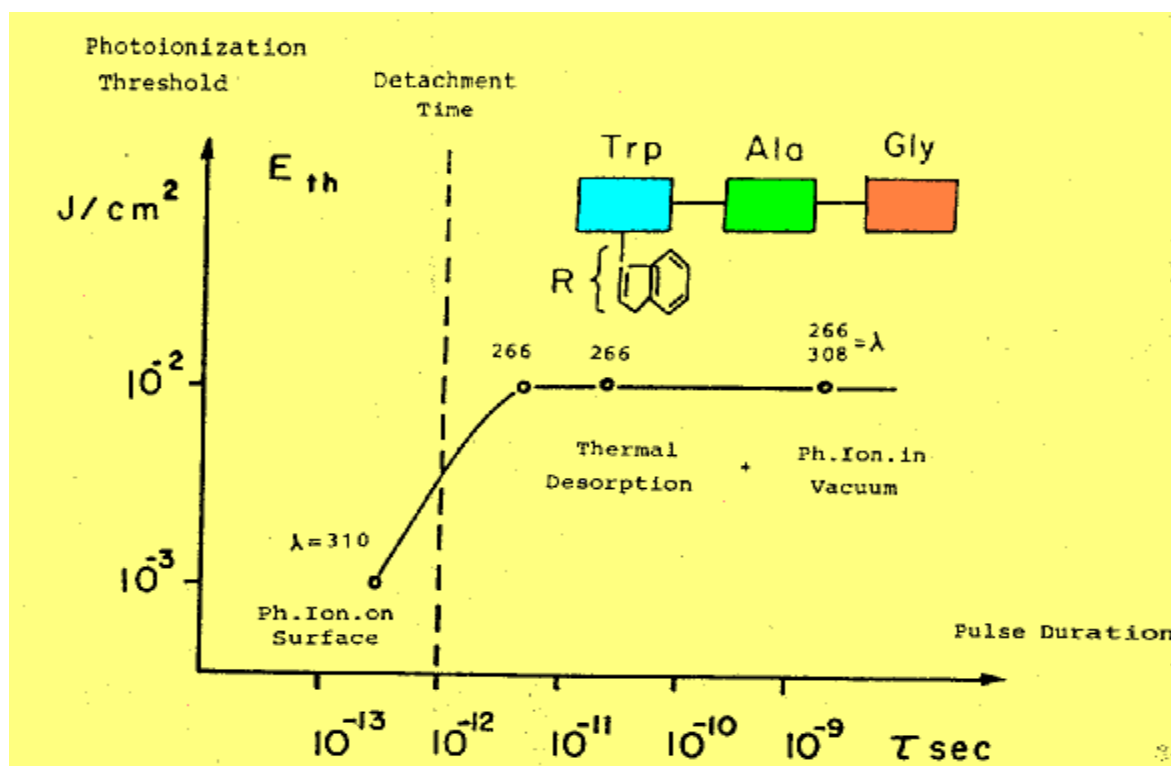


Рис.1. Зависимость порога фотоотрыва хромофора (триптофан) от длительности возбуждающего импульса.

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 донор 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  $D_2O$  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, 45], полимерах и других углерод-содержащих материалах [37,38], полупроводниковых микрополостях [39]. С 1996 г. совместно с ЦКБ УП проводятся эксперименты по **ахроматическому восстановлению волнового фронта** с помощью фемтосекундных лазерных импульсов [40]. 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] (совместно с лабораторией лазерной спектроскопии).

Экспериментальные исследования проводятся на лазерном фемтосекундном спектрометре, созданном в ИСАН [3]. Схема эксперимента (рис.2) такова: коротким возбуждающим импульсом длительностью менее 100 фс и интенсивностью от  $10^8$  до  $10^{13}$  Вт/см<sup>2</sup> производится сильный разогрев носителей заряда и отрыв температуры электронов от температуры решетки. С помощью зондирующего импульса, меняя его задержку относительно возбуждающего в пределах от 0 до 1 нс, можно наблюдать кинетику неравновесной системы, т.е. следить за динамикой передачи энергии от электронной подсистемы фононам решетки. Зондирование может производиться в широком спектральном диапазоне от 0,26 до 1 мкм. При этом возможно измерение как коэффициента поглощения исследуемого образца, так и коэффициента отражения.

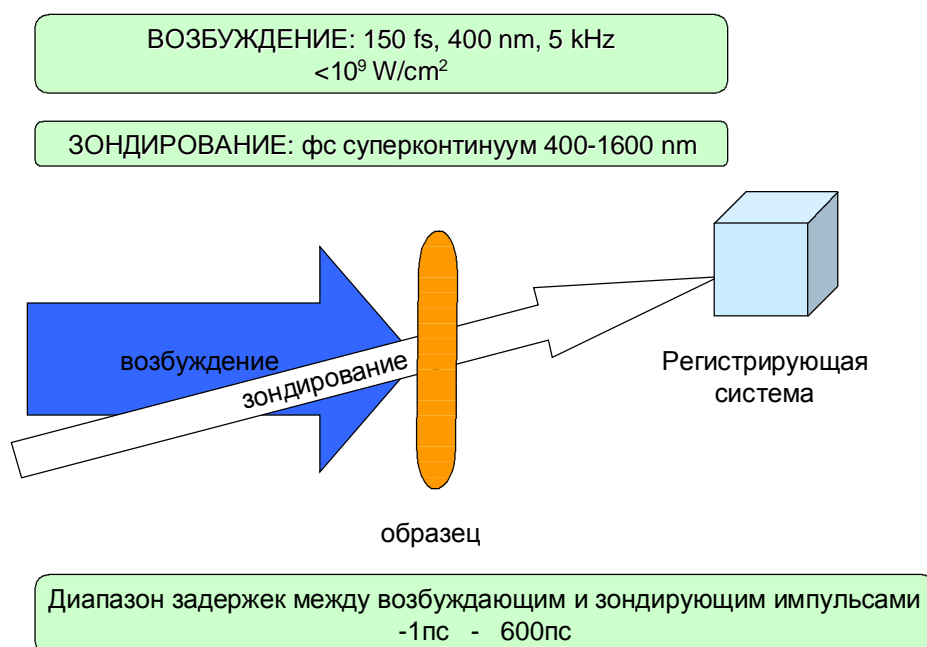


Рис.2. Схема эксперимента типа «возбуждение – зондирование».

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 фоонов 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.

Действительно, время межэлектронных столкновений в нормальных металлах обычно мало  $\sim 10^{-14}$  с, так что на временах  $t > 10^{-13}$  с в электронной подсистеме устанавливается квазиравновесие и можно ввести понятие электронной температуры. Возрастание электронной температуры, определяемое задержанными по времени зондирующими импульсами, приводит к следующим основным процессам:

(1) Размытие функции распределения носителей вблизи уровня Ферми, приводящее к уменьшению заселенности электронных состояний ниже уровня Ферми и увеличению заселенности электронных состояний выше уровня Ферми. В результате изменение диэлектрической функции  $\epsilon_2(\omega)$  при возбуждении будет проявляться как знакопеременная функция с обращением в ноль в точке  $\omega_F$ , соответствующей переходам на (или из) уровня Ферми. Таким образом, фемтосекундная спектроскопия позволяет определить положение уровня Ферми из условия  $\Delta\epsilon_2(\omega_F) = 0$  [22,23,25].

(2) Сдвиг уровня Ферми. В хороших металлах этот эффект очень мал, но в плохих металлах может быть значительным.

При временных задержках, короче времени электрон-фононной релаксации (для нормальных металлов это время  $\sim 1$  пс [22]), эти процессы являются определяющими. Для их наблюдения зондирующий и возбуждающий импульсы должны иметь длительность, значительно меньшую времени электрон-фононной релаксации, поэтому требуются импульсы длительностью  $\sim 100$  фс или еще короче.

Методом фемтосекундной лазерной спектроскопии 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  $\lambda\langle\omega^2\rangle = (27\pm 4)$  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  $\frac{3}{4}$  в микрокристаллитах CdS-CdSe в стеклянной матрице [18-19].

Как известно, механизм, ответственный за возникновение притяжения между электронами в ВТСП, до сих пор является предметом жарких дискуссий. Выяснению механизма сверхпроводимости оксидных соединений может способствовать определение величины константы электрон-фононного взаимодействия  $\lambda$  (либо параметра Элиашберга  $\lambda\langle\omega^2\rangle$ ). Единственным прямым методом измерения параметра  $\lambda\langle\omega^2\rangle$  для ВТСП явилось бы исследование энергетической релаксации *неравновесных* электронов в реальном времени. Но для этого необходим метод, позволяющий исследовать эти процессы в фемтосекундном диапазоне времен. Фемтосекундная оптическая спектроскопия позволяет в рамках одного эксперимента не только непосредственно определять параметр электрон-фононного взаимодействия и величину сверхпроводящей щели, но и наблюдать в *реальном (фемтосекундном) масштабе времени* изменения в электронном спектре, связанные с возникновением или уничтожением новой фазы — сверхпроводящего состояния [23-26]. В



результате оказывается возможным получение уникальной информации о природе сверхпроводящего состояния в этих материалах, в частности, о роли электрон-фононного механизма взаимодействия в этих материалах.

После выделения при  $T > T_c$  спектральной области, соответствующей переходам из некоторой зоны в окрестность уровня Ферми, становится возможным наблюдение *изменения* оптических спектров при переходе из нормальной фазы в сверхпроводящую (и наоборот): спектральная ширина наблюдаемого разностного отклика оказывается непосредственно связанной с величиной сверхпроводящей щели [23].

**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  $I \langle w^2 \rangle \sim 500$  (мэВ)<sup>2</sup> (соответствующее  $I \gg 1$ ) [23-25]. Из оптических спектров ( $hw \gg D$ !) при  $T < T_c$  оценена величина сверхпроводящей щели  $D \sim 30$  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.

С помощью аппроксимации экспериментальных кинетик подгоночными двухэкспоненциальными зависимостями  $\Delta D_{fit}(t)$  была получена спектральная зависимость скорости релаксации оптической плотности  $\tau_1$ . Совместно с лабораторией нанофизики был предсказан и обнаружен резкий рост времени энергетической релаксации электронов в определенных спектральных областях, связываемых с переходом в окрестность уровня Ферми. Обнаруженная зависимость открывает возможность для нового метода определения положения уровня Ферми [22]. Возможность применения этого метода продемонстрирована для металлов (Au) [22] и высокотемпературных сверхпроводников ( $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ ) [25]. Наконец, спектроскопия с субпикосекундным временным разрешением позволила исследовать **спектр когерентных низколежащих фононных колебаний** [53]. Это дает интересную информацию о колебаниях, наиболее сильно взаимодействующих с электронами.

**Исследованы процессы энергетической релаксации неравновесных возбуждений в пленках  $C_{60}$  в широкой спектральной области 1.0-3.6 eV [27-32,34,36].** Свойства фуллеренов - молекул, состоящих из атомов углерода, образующих замкнутую сферическую или сфероидальную оболочку, привлекают в последние годы особое внимание. Молекула  $C_{60}$ , имеющая симметрию  $I_h$ , является наиболее сферически симметричной из всех известных молекул. Интенсивные исследования этой молекулы связаны не только с ее геометрическим совершенством, но и с рядом других замечательных свойств. Выяснение особенностей переноса заряда в фуллеренсодержащих материалах требует тщательного исследования механизмов фотопроводимости в чистых фуллереновых пленках, поэтому этой теме посвящено достаточно много работ. Однако противоречивость полученных к настоящему времени результатов по исследованию методом возбуждение-зондирование релаксации фотовозбужденных молекул в пленках  $C_{60}$  с фемтосекундным временным разрешением связана главным образом с тем, что значительная доля экспериментов была проведена при возбуждении и зондировании на одной и той же длине волны. При такой постановке эксперимента в принципе невозможно обнаружить многокомпонентность исследуемой системы возбужденных молекул. При исследовании релаксации в экспериментах типа возбуждение-зондирование разные компоненты (и их механизмы

релаксации) могут проявляться при зондировании в разных областях спектра - и в таком случае характерные особенности этих механизмов могут быть изучены сравнительно просто, даже если релаксация разных компонентов происходит в одном и том же временном масштабе. Однако сильное перекрытие широких спектральных линий возникающих фотопродуктов, типичное для твердых тел, может существенно затруднить исследования. В экспериментах с широкополосным зондированием исследована фемтосекундная динамика фотоиндуцированной оптической плотности сверхтонкой пленки  $C_{60}$  и **обнаружена спектральная зависимость времени релаксации фотоиндуцированного отклика от длины волны зондирования** [27].

Анализ динамики изменения разностного спектра [36] 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 (рис.3). Это означает, что одновременно существуют по меньшей мере 3 различных компонента, каждый из которых релаксирует со своей кинетикой.

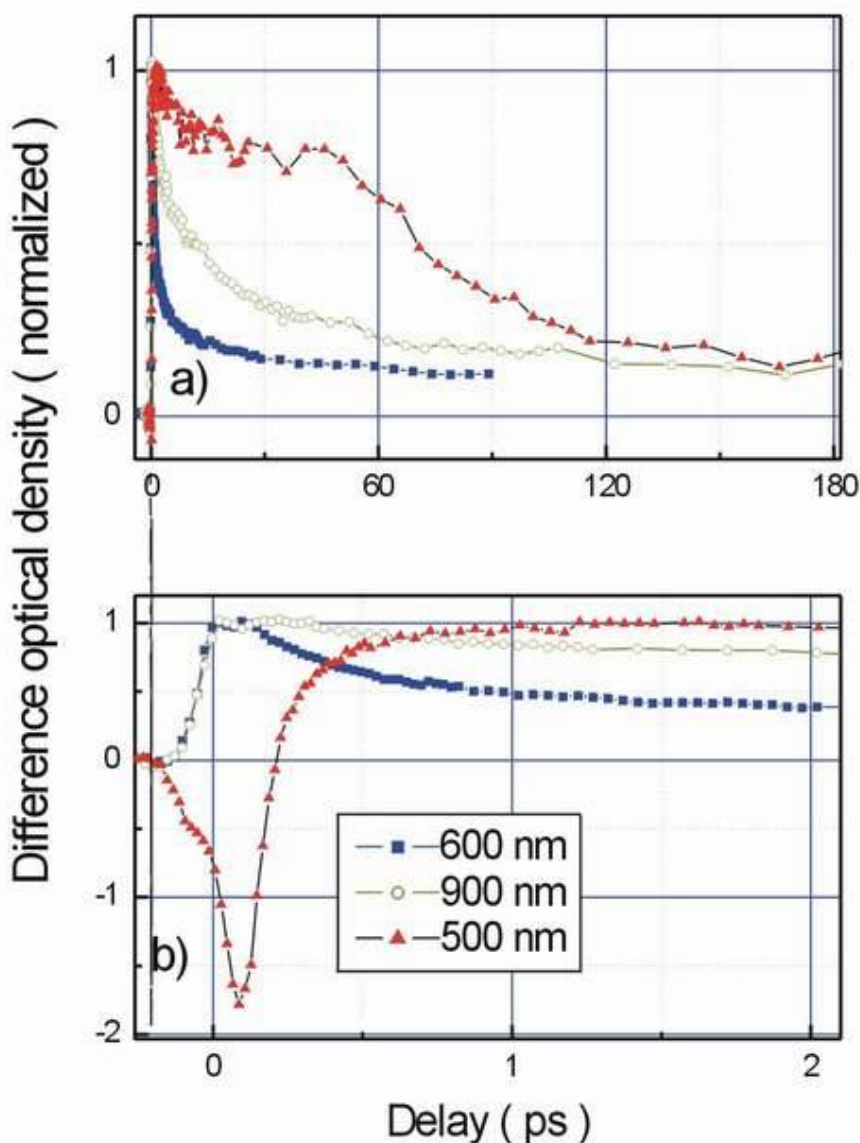


Рис. 3. Кинетики различных полос  $C_{60}$ , полученные при широкополосном зондировании [36].

Проведенные исследования показали, что при возбуждении пленок  $C_{60}$  100 фс импульсами на 645 нм ( $10^{10}$  -  $10^{11}$  Вт/см<sup>2</sup>) и на 367 (345) нм ( $10^9$  Вт/см<sup>2</sup>) **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. Это захват электронов молекулами  $C_{60}$  с образованием возбужденных анионов, рекомбинация электронов и катионов и (при наличии кислорода) захват электронов глубокими ловушками. Локализованные катионы и анионы рекомбинируют и захватываются глубокими ловушками существенно медленнее. 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 10-400 см<sup>-1</sup> [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  $I > 10^{11}$  Вт/см<sup>2</sup> 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.

Исследованы **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 последнем случае [35].

Композитные фуллереносодержащие пленки активно исследуются в последние годы в связи с проблемой создания высокоэффективных преобразователей солнечной энергии, материалов нелинейной оптики и оптических компьютеров. В лаборатории проведены **фемтосекундные исследования динамики разностных спектров при фотовозбуждении композитных материалов из  $C_{60}$  и олова, которые обнаружили сильную зависимость наблюдаемой релаксации от соотношения и пространственного распределения фуллерена и металла.** Первичные стадии релаксации интерпретированы как мгновенный перенос заряда с атома металла на ковалентно связанную молекулу фуллерена в полимерных цепях и как обмен электроном и перенос энергии возбуждения в системе нанокристаллит металла - анион  $C_{60}^-$ , сопровождающиеся релаксацией возбужденной электронной подсистемы металла [45].

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.

Нелинейная оптика тонкопленочных микрорезонаторных структур типа резонаторов Фабри-Перо в последнее время привлекает пристальное внимание, поскольку устройства такого рода могут служить основой для создания новых систем передачи и обработки

информации быстродействующими оптическими средствами. Вместе с тем, вопросы взаимодействия ультракоротких импульсов с планарными микрорезонаторными структурами, содержащими нелинейные среды конечной толщины, изучены крайне недостаточно. В связи с этим, в лаборатории проводится исследование эффектов нелинейного взаимодействия ультракоротких импульсов света с тонкослойными планарными резонаторными структурами типа резонаторов Фабри-Перо.

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]. 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.**

Совместно с ЦКБ УП и ГОИ проводились эксперименты по исследованию особенностей объемных голограмм, создаваемых с помощью фемтосекундных лазерных импульсов [40]. 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.4).

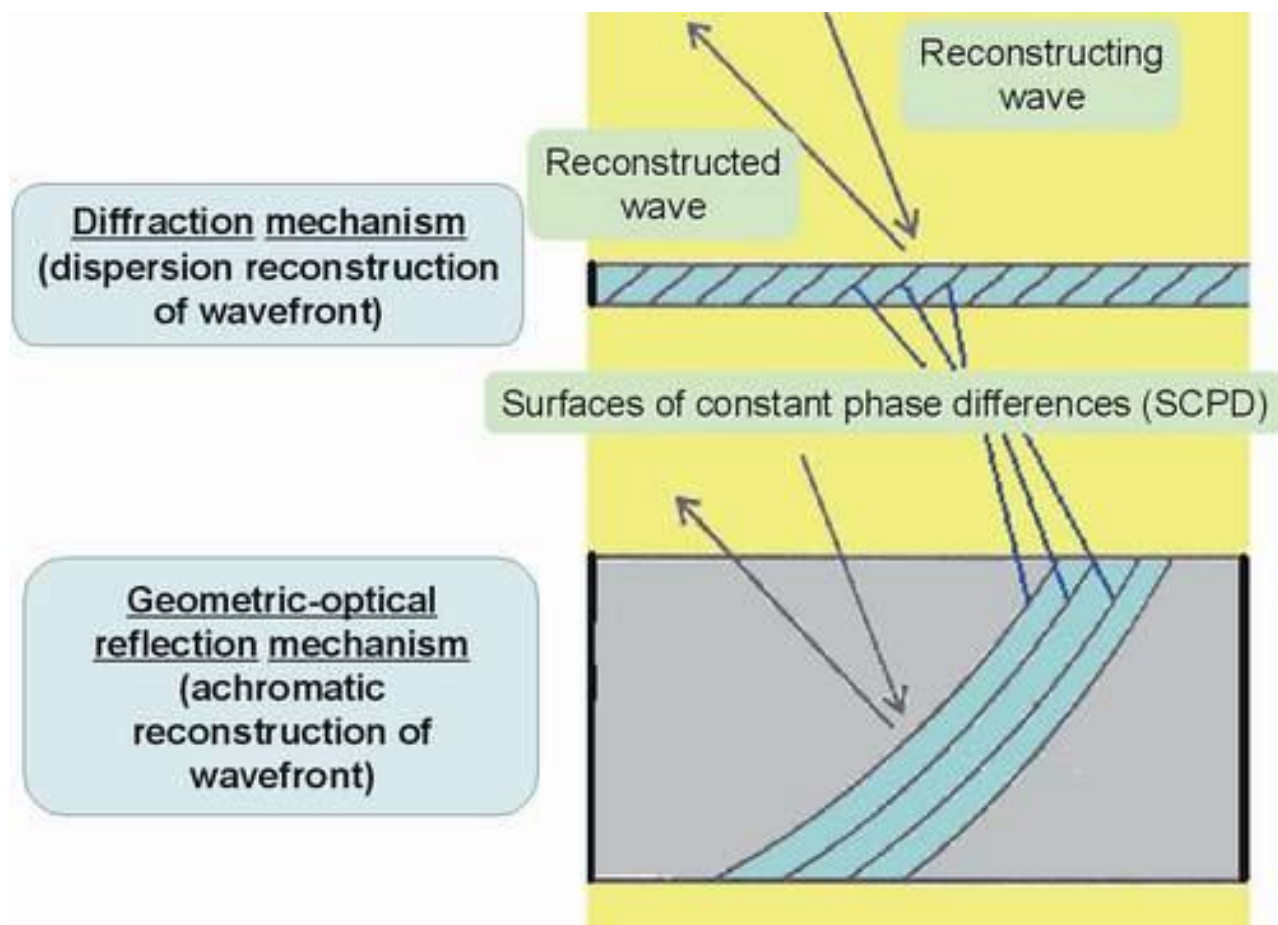


Рис.4. Механизмы дифракционного и ахроматического восстановления волнового фронта.

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] (Рис.5). В эксперименте наблюдалась квадратичная зависимость фототока от мощности лазерного облучения, которая ясно демонстрирует двухфотонный характер внешнего фотоэффекта. Полевые эмиссионные изображения острия волокна приведены на рисунке. приведена зависимость квадратного корня от интенсивности фототока от расстояния до центра апертуры  $r$ , то есть распределение  $E^2(r)$ . Такая зависимость представляет собой невозмущающее измерение распределения электрического поля света в субволновой апертуре.

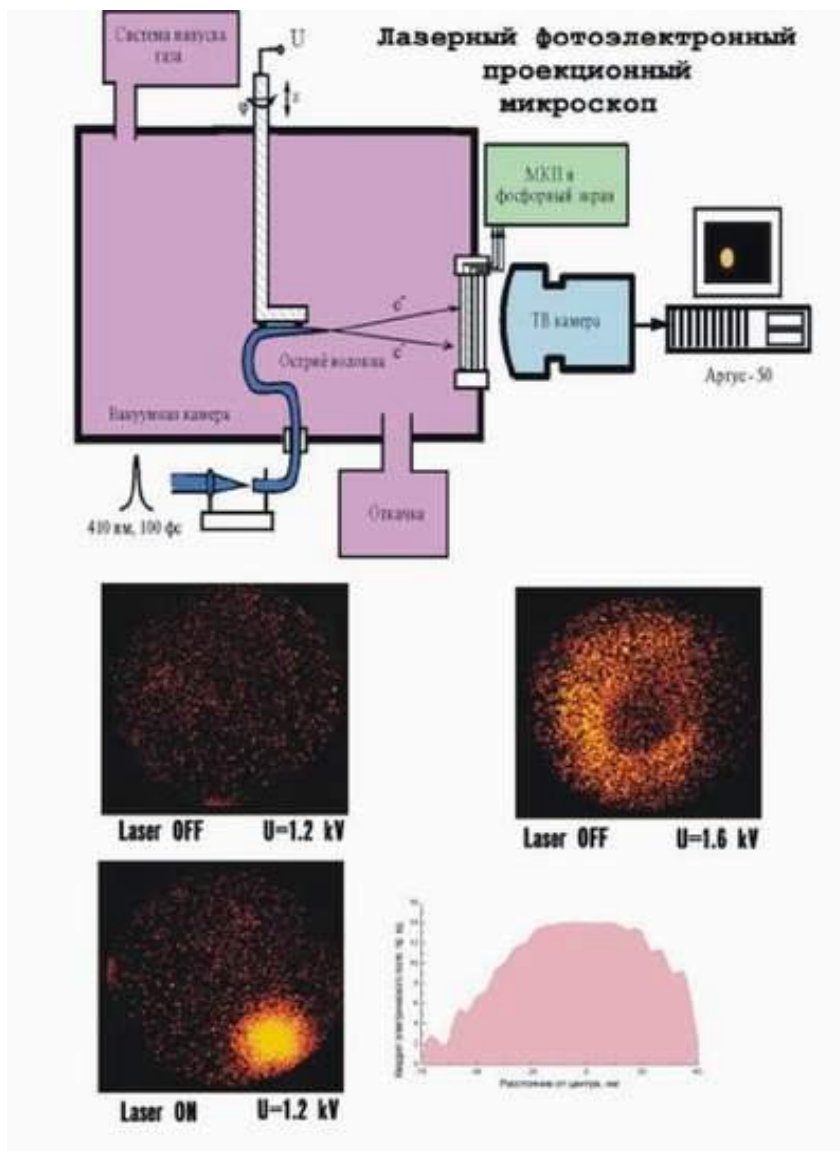


Рис.5. Эксперимент по невозмущающему измерению ближнего поля света [44].

## Лазерный центр



Рис.6.

В настоящее время в лаборатории завершается строительство нового фемтосекундного центра коллективного пользования (рис.6) и отладка лазерной части (генератор, усилитель и преобразователи частоты фирмы Spectra Physics, рис. 7) и двух систем регистрации для проведения экспериментов типа «возбуждение-зондирование» – высокочувствительной одноканальной для работы с фиксированной длиной зондирования (совместно с ООО «Авеста –проект») и уникальной широкополосной многоканальной системы для работы на частоте 1 кГц (совместно с ООО «Клуб деловых партнеров»).



## Femtosecond Laser Spectrometer

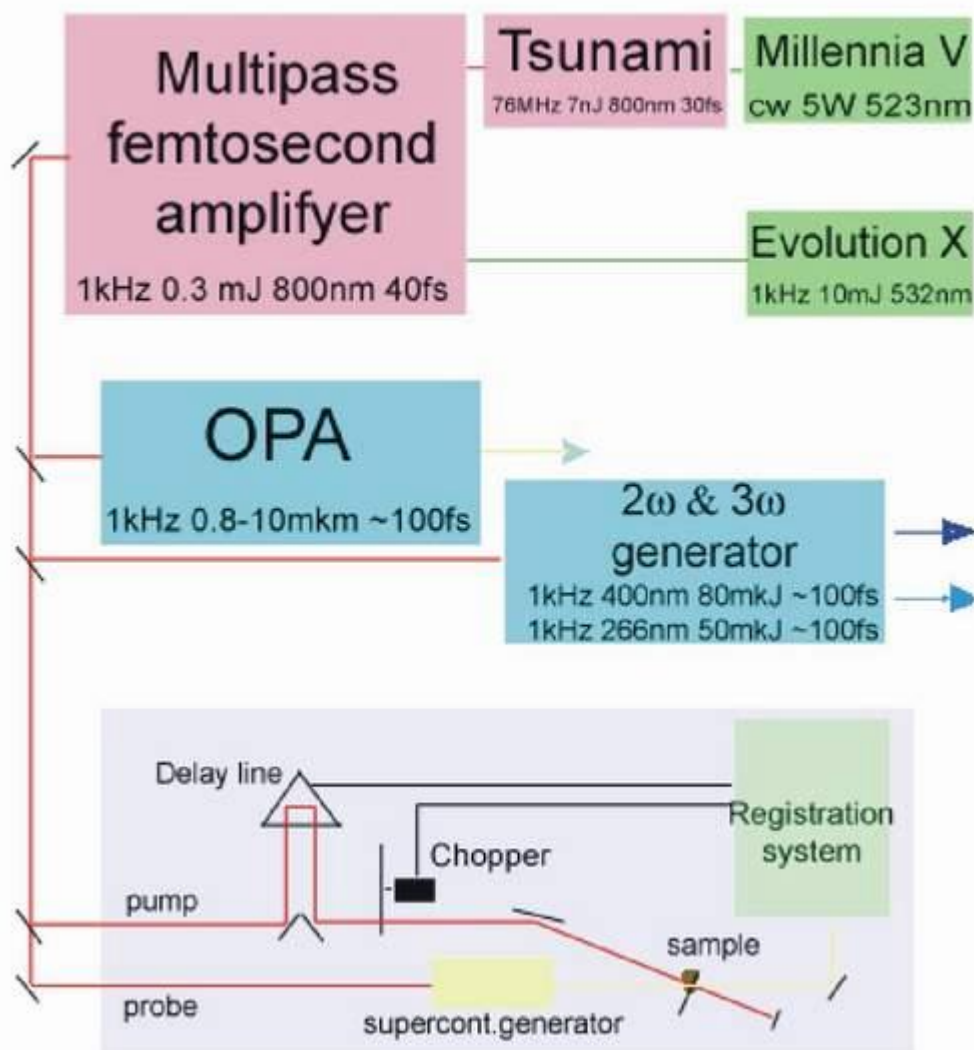


Рис.7. Схема фемтосекундного лазерного спектрометра.

В своих исследованиях лаборатория много и плодотворно сотрудничает как с другими лабораториями института (с лабораторией лазерной спектроскопии, д.ф.- м.н. В.С.Летохов, с лабораторией нанопластики, 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), так и с другими институтами как в России (с Физическим институтом им. П.Н.Лебедева, с Институтом биохимической физики РАН, с Институтом общей физики РАН, с ЦКБ УП РАН), так 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. Yarzev 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 CdSe<sub>x</sub>S<sub>1-x</sub> micro-crystallites in glass matrixe 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 powerfull femtosecond pulse in semiconductor doped glasses at the energies higher that 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.Loizovik, 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. Lozovik, 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. Lozovik. 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. Lozovik, 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  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-d}$  при фемтосекундном лазерном возбуждении. Письма в ЖЭТФ, том 66, вып.9, стр.739-743 (1995).
27. Чекалин С.В., Фарзтдинов В.М. Акссон Е., Сундстрем В. Релаксация  $\text{C}_{60}$  в растворах и пленках: результаты фемтосекундных исследований. Письма в ЖЭТФ, 1993, 58(4), 286-290.
28. V.M.Farztdinov, Yu.E. Lozovik, Yu.A. Matveets, A.G. Stepanov, and V.S. Letokhov. Femtosecond Dynamics of Photoinduced Darkening in  $\text{C}_{60}$  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  $\text{C}_{60}$  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  $\text{C}_{60}$  Films. Phys. Rev. B 56(7), 4176-4185, 1997.
33. Chekalin S.V. Phototransformation in visible and near-IR femtosecond pump-probe studies of  $\text{C}_{60}$  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  $\text{C}_{60}$ , 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  $\text{C}_{60}$  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. (2003) (in press).
45. 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  $C_{60}/Sn$  nanostructures.- Synthetic Metals v.139 p. 799 (2003).

## ОТДЕЛ ЛАЗЕРНО-СПЕКТРАЛЬНОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ (ЛСП)



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 23 человека, включая 5 специалистов ОП. При наличии большого числа заказов из лабораторий, договоров и контрактов со сторонними организациями численность отдела может достигать 30 человек за счет привлечения к таким работам временных коллективов специалистов. 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. д.ф.-м.н. профессор В.С.Летохов).

Первые разработки отдела ЛСП связаны с созданием совместно с лабораторией 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), для чего были разработаны импульсные перестраиваемые лазеры на красителях с узкой линией излучения, устройства для измерения их длины волны и выходной мощности, фоторегистрирующая система, различные оптико-механические узлы (оптический конструктор).

Следующим крупным шагом в развитии и становлении отдела стала разработка совместно с лабораторией молекулярной спектроскопии высокого разрешения и аналитической 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 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, 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 изготовлено 10 таких 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.

В процессе осуществления крупных принципиальных разработок сформировался коллектив отдела ЛСП, в костяк которого наряду с вышеупомянутыми сотрудниками вошли к.ф.-м.н. В.М.Апатин, Б.В.Архангельский, А.М.Александров, В.А.Веселов, к.ф.-м.н. А.А.Качанов, И.В.Колпаков, М.А.Павлов, к.т.н. Э.Г.Силькис, В.С.Шишковский, Б.Н.Борисов, В.В.Годнев, Г.Ю.Лопатовский, А.С.Станкевич, С.Ф.Кольяков.

Серьезной разработкой последних десяти лет явилось создание отделом автоматизированного комплекса селективного лазерного ионного источника RILIS на основе импульсных перестраиваемых лазеров на красителях с накачкой лазерами на парах меди,



Рис. 01 Комплекс перестраиваемых лазеров для лазерной резонансной фотоионизации атомов

предназначенного для селективной фотоионизации и высокочувствительного детектирования 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 востребуемым 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.

В последние годы усилия коллектива отдела все больше смещаются в направлении создания широкого класса малогабаритных аналитических спектральных приборов, использующих различные принципы и отличающихся объектами исследования, спектральным диапазоном, чувствительностью, степенью сложности, масштабом использования.

В частности, с 1997 г. 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). Измеряя при помощи портативного дихрометра аномальный круговой дихроизм, генерируемый при взаимодействии биологически активных соединений с жидкокристаллическим биодатчиком, 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.. Другие достоинства 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. Созданный оптический биосенсор не имеет аналогов по принципу действия. Новизна совместной разработки двух институтов РАН (при участии Института биохимии Университета г.Мюнстер, ФРГ) 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.).

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.

Другими направлениями работ отдела ЛСП остаются создание перестраиваемых лазеров для спектральных исследований; разработка средств управления и контроля длиной волны лазерного излучения; разработка спектральных приборов высокого и сверхвысокого разрешения; создание высокочувствительных систем регистрации слабых спектров, включая многоканальные; электронные, микропроцессорные и программные средства проводимых приборных разработок; 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:

— 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.





Рис. 02

Узкополосный перестраиваемый лазер на красителях с накачкой лазером на парах меди (1) и микропроцессорным управлением длиной волны (2)

- Разработана гамма оригинальных электромеханических устройств (гальванометрических сканаторов-позиционеров) для быстрого (10-1000 мс) прецизионного (0,2-10") углового (до 360°) позиционирования 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.. Другие особенности устройств - квазиоптимальная обратная связь по положению ротора для векторного и растрового управления, двигатель с подвижной катушкой, высокостабильный индуктивный датчик углового положения ротора, высокая помехоустойчивость, конструктивное исполнение электроники OEM типа. Авторы разработок: Иг.Н.Нестерук, В.В.Колосов, Ир.Н.Нестерук, В.А.Пакутнев, А.С.Станкевич. Изготовлено более 50 таких устройств для лазеров, монохроматоров, для управления положением светового луча и других целей.



*а*

*б*

*в*

Рис. 03

Высокоточные быстродействующие устройства для позиционирования оптических элементов:  
*а, б* - одно- и двухкоординатные устройства управления световым лучом; *в* - устройство для поворота дифракционной решетки дихрометра

- Разработаны простые малогабаритные калибраторы длины волны лазерного излучения, которые в сочетании со сканатором-позиционером и с помощью простейших программных средств управления позволяют устанавливать длину волны перестраиваемого лазера с точностью 5 пм (В.М.Гусев, Иг.Н.Нестерук, М.А.Павлов, В.С.Шишковский). Созданы прецизионная и компактная версии автоматического измерителя длины волны лазерного излучения в области 400-1100 нм на основе интерферометра Физо и фотодиодной линейки с разрешением  $2 \times 10^{-7}$  и  $10^{-5}$  соответственно и порогом измерения 0,3 мкДж в



импульсе (к.ф.-м.н. А.А.Качанов, И.В.Колпаков, А.М.Александров, к.т.н. Э.Г.Силькис). Изготовлено более 25 калибраторов и более 10 измерителей длины волны;

— Разработана целая гамма малогабаритных монохроматоров, полихроматоров и спектрографов различной сложности на основе универсальных дифракционных решеток с широким диапазоном изменения обратной линейной дисперсии (40-0,04 нм/мм) и разрешающей способности (к.т.н. Д.А.Журавлев, к.т.н. В.П.Журавлева);

— Созданы высокочувствительные системы регистрации на основе фотоэлектронных и вторичных электронные умножителей (Б.В.Архангельский, Б.Н.Борисов, И.В.Колпаков) и большой типоряд многоканальных оптических регистраторов спектра МОРС (к.т.н. Э.Г.Силькис, А.В.Пелезнев, В.Д.Титов, совместно с фирмой «МОРС»), использующих в качестве многоканальных фотоприемников различные типы линейных приборов с зарядовой связью (ЛПЗС) или их волоконно-оптические сочленения с электронно-оптическими преобразователями с управлением от персональных компьютеров. Использование таких многоканальных систем регистрации спектра вместе с малогабаритными дифракционными полихроматорами позволило создать весьма компактные спектрометры (весом до 3 кг) чрезвычайно широкого применения. С 1989 г. изготовлено более 500 систем МОРС, используемых в научных исследованиях, в астрономии, геологии, криминалистике и др. областях.

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). Оснатив отечественное спектральное оборудование прогрессивной системой регистрации в виде ФЭК, пользователь получает современный прибор для анализа элементного состава горных пород и почв. Его достоинства: многократное сокращение времени анализа - результат анализа получается немедленно после завершения измерения, файл отчета готов к распечатке; существенно более высокая точность - особенно при анализе малых концентраций; объективность - исключаются ошибки со стороны оператора при ручной денситометрии и построении графика; отсутствие надобности в обеспечивающих фотопроект специальной комнате, фотоматериалах, реактивах, денситометре.

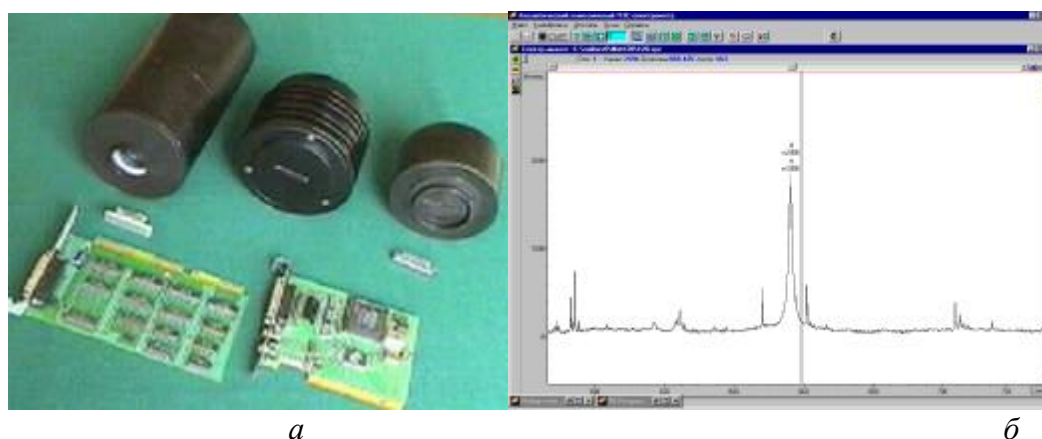


Рис.04

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

В период с 1996 по 2002 г. изготовлено 56 ФЭК на базе ЛПЗС японских фирм, из которых 25 ФЭК использованы для оснащения малогабаритных анализаторов сплавов типа «Папуас».

— Созданы новые конструкции атомизаторов и вакуумных камер, источников питания, большое число электронных узлов и новые программные средства автоматизированных спектрометров (к.т.н. Е.Л.Михайлов, Б.Н.Борисов, В.А.Веселов, В.В.Годнев, И.В.Колпаков, Г.Ю.Лопатовский, М.А.Павлов, В.С.Шишковский);

— При участии специалистов отдела ЛСП создан 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 ЭСМ), модернизировано и автоматизировано в Институте большое число лабораторных экспериментальных установок;

— 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 (БАТС) в физиологических жидкостях (к.т.н.Е.Л.Михайлов, С.Ф.Кольяков, М.А.Павлов, В.В.Колосов, В.В.Годнев, А.М.Александров, Д.А.Александров, Г.Ю.Лопатовский, В.М.Гусев.). На рубеже 2000-2001 г. к новой биотехнологии и прибору проявила серьезный интерес российская банковско-инвестиционная компания «Лидинг». Переговоры привели к стратегическому партнерству двух институтов РАН и компании и к долговременному инвестированию средств компанией в программу коммерциализации разработки. В настоящее время 5 изготовленных в ИСАН образцов прибора используются в лабораториях РАН и в НИЦ биомедицинских технологий для разработки новых типов биодатчиков и методик определения БАТС с целью расширения области применений указанной биотехнологии. Малосерийное производство дихрометров освоено на Экспериментальном заводе научного приборостроения РАН в г.Черноголовка Московской обл., изготовлена первая опытная партия из 10 приборов.



Рис. 05

Портативный дихрометр для решения биоаналитических задач с использованием биодатчиков на основе жидкокристаллических дисперсий 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 институтами страны, а также с научными центрами Ю.Кореи, КНР, Индии, с университетами ФРГ, США. 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 статьи последних 5 лет***

#### ***Награды***

Золотая медаль и диплом 50-го Международного салона (выставки) изобретений и инноваций в науке и промышленности „Брюссель-Эврика-2001“ (Бельгия).

Гран-При и диплом за победу II конкурса русских инноваций (Москва, июнь 2003 г.).

#### ***Патенты***

*Ю.М.Евдокимов, С.Г.Скуридин, Б.А.Чернуха, Е.Л.Михайлов, О.Н.Компанец, С.Н.Романов, В.В.Колосов.* «Способ определения в анализируемой жидкости БАВ и устройство для его осуществления». Патент РФ №2107280 (1998 г.) с приоритетом от 15.11.1996.

*Yu.M.Evdokimov, S.G.Skuridin, B.A.Chernukha, E.L.Mikhailov, O.N.Kompanets, S.N.Romanov, V.V.Kolosov.* “Method for detecting a biologically active substance in a liquid to be analyzed and device for realizing the same”. European Patent EP881485A1, issued Dec.2, 1998, filed Nov.14, 1997.

*Ju.M.Evdokimov, S.G.Skuridin, B.A.Chernukha, E.L.Mikhailov, O.N.Kompanets, S.N.Romanov, V.V.Kolosov.* “Method for determination of a biologically active substance in an analyzed liquid and device for its realization”. US Patent US 6,246,470 B1, issued June 12, 2001, filed Nov. 14, 1997.

*Kompanets O.N., Evdokimov Yu.M., Spener F.* “Vorrichtung und Verfahren zur Erfassung und Bestimmung von biologisch aktiven Substanzen” («Устройство и методика оценки и определения биологически активных веществ»). Патент ФРГ № 100 35 79 C2 на полезную модель с приоритетом от 21.07.2000 г., выдан 23.05.2002 г. Патентным ведомством ФРГ (г.Мюнхен).

*Нестерук И.Н.* «Карцевый генератор стабилизированный по амплитуде». Патент РФ №2212091 (2003 г.) с приоритетом от 14.09.2001.

#### ***Литература***

*О.Н.Компанец.* Новые разработки оптико-спектральных приборов в Институте спектроскопии РАН. Успехи физических наук, т. 42 (3), стр. ...- ... (1999).

*O.N.Kompanets.* New developments of optical spectral instruments in the Institute of Spectroscopy, RAS. Physics-USpekhi, 42 (3), p. 290-292 (1999).

*Lettry J., Catherall R., Focker G.J., Jonsson O.C., Kugler E., Ravn H., Tamburella C., Fedoseyev V., Mishin V.I., Huber G., Sebastian V., Koizumi M., Koster U.* Recent developments of the ISOLDE laser ion source. - Rev.Sci. Instrum., v.69, No.2, p.761-763 (1998).

*И.Н.Нестерук.* Гальванометрические сканаторы в оптических приборах. Лазер-информ, №7, стр.190 (2000).

*V.N. Fedoseyev, G. Hubert, U. Koster, J. Lettry, V.I. Mishin, H. Ravn, V. Sebastian and the ISOLDE Collaboration.* The ISOLDE laser ion source for exotic nuclei. Hyperfine interactions, 127, p. 409 (2000).

*С. Ф. Кольяков, Л. В. Пятибрат, Е. Л. Михайлов, О. Н. Компанец, Т. И. Кару.* Изменение спектра кругового дихроизма суспензии живых клеток после низкоинтенсивного лазерного облучения ( $\lambda=820$  нм). Доклады Академии Наук, v.377, №6, стр. 824-827 (2001).

*И.Н.Нестерук.* Гальванометрические сканаторы для лазерных технологических комплексов. Лазер-информ, №15-16, стр.222-223 (2001).

*Ю.Евдокимов, О.Компанец.* Биосенсоры – прорыв в будущее. Промышленник России, № 6-7 /2002 (июль), стр. 28-31.

*Ю.Евдокимов, О.Компанец.* Биосенсоры: от идеи к практике. Наука в России, изд. Президиума РАН, №4/2002 (июль-август), стр.52-55.

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ОТДЕЛ



Теоретический отдел (зав. отделом проф. В.М. Агранович) был создан в 1969 году. Он состоит из двух секторов: сектор нелинейной спектроскопии (зав. сектором д.ф.-м.н. С.А.Дарманян) и сектор спектроскопии фазовых переходов (зав. сектором д.ф.-м.н. А.Г.Мальшуков). В отделе работают 14 сотрудников, из них 6 докторов и 5 кандидатов физ.-мат. наук.

Основным научным направлением теоретического отдела является линейная и нелинейная спектроскопия конденсированных сред.

### Спектроскопия конденсированного состояния

#### Электронные возбуждения в наноструктурах.

1 Экситоны, поляритоны и перенос энергии в органических и гибридных наноструктурах. Проведены систематические исследования электронных состояний и резонансного переноса энергии в гибридных наноструктурах, содержащих органические и неорганические полупроводниковые материалы [1]. Обнаружена высокая эффективность безизлучательного переноса энергии от полупроводниковых наноструктур (квантовых ям и квантовых точек) органическому материалу с перекрывающимися спектрами электронных возбуждений [2-5]. Показано, что в ряде случаев время переноса энергии экситона Ванье-Мотта органике оказывается меньше времени жизни экситона при отсутствии органического покрытия. На основе этих исследований сформирована новая концепция создания световых источников света при электрической накачке [6].

2. Гибридизация экситонов Френкеля и экситонов с переносом заряда. Проведен анализ электронных состояний в квази-одномерных кристаллах с сильным перекрытием молекулярных орбиталей [7-9]. В таких кристаллах смешивание экситонов Френкеля и экситонов с переносом заряда определяет природу нижайших экситонных состояний. Результаты теории позволили провести интерпретацию наблюдаемых спектров поглощения и испускания для многих используемых в опто-электронике кристаллов типа кристаллов РТСДА. В такого рода кристаллах обнаружены поверхностные экситонные состояния типа поверхностных электронных состояний Тамма [7]. Показано, что эти состояния приводят к эффектам квантового конфанмента [10] экситонных состояний в тонких кристаллических пленках.

3. Исследования поляритонов в органических микрорезонаторах. Интенсивные исследования поляритонов и расщепления Раби в полупроводниковых микрорезонаторах ведутся, в частности, в связи с проблемой создания поляритонного лазера. Было показано в ИСАН, что в микрорезонаторах, содержащих органику, расщепление Раби может быть увеличено в десятки раз [11]. Последующие экспериментальные исследования, проведенные Шеффилде [12-14], подтвердили это предсказание теории и одновременно выдвинули целый ряд вопросов теории. В упомянутых исследованиях использовались не кристаллические, а неупорядоченные органические материалы. Развитая теория поляритонов в такого рода микрорезонаторах [15-16] показала, что в этом случае в спектре электронных возбуждений присутствуют не только когерентные, но и некогерентные состояния, что качественно изменяет кинетику важнейших релаксационных процессов в микрополости.

## Литература:

1. Excitons and optical nonlinearities in hybrid-organic-inorganic nanostructures" V.M.Agranovich, D.M.Basko, G.C.La Rocca, F.Bassani, J Phys Cond Mater, 10(1998)9369; "Hybrid Frenkel-Wannier-Mott excitons at interfaces and in microcavities", V. Agranovich, G. La Rocca, F. Bassani, H. Benisty, C. Weisbuch Optical Materials 9 (1998) 430
2. "Efficient electronic energy transfer from a semiconductor quantum well to an organic material", V.M.Agranovich, G.C.La Rocca, F.Bassani, JETP Letters 66(1997)714
- 3."Förster energy transfer from semiconductor quantum well to organics " D. M. Basko, G. C. La Rocca, F. Bassani and V. M. Agranovich, Eur. Phys. J. B8 (1999)353
4. "Resonance transfer energy from semiconductor quantum dot to organics", V M Agranovich and D M Basko JETP Letters,69 ( 1999) 232
5. "Electronic energy transfer in a microcavity", D. M. Basko, F. Bassani, G. C. La Rocca and V. M. Agranovich, Phys.Rev.B, December 2000
- 6."New concept for LEDs: non-radiative electronic energy transfer from semiconductor quantum well to organic overlayer", V.M. Agranovich, D.M. Basko, G.C. La Rocca, F. Bassani, Synthetic Metals 116 (2001) 349-351.
7. 244) "Surface states in molecular chains with strong mixing of Frenkel and charge-transfer excitons." V. M. Agranovich, K. Schmidt, K. Leo Chem. Phys. Letters 325 (2000) 308-316
- 8."The lowest energy Frenkel and charge-transfer excitons in quasi-one-dimensional structures: application to MePTSDI and PTCDA crystals", M. Hoffmann, K. Schmidt, T. Fritz, T. Hasche, V.M. Agranovich, K. Leo, Chemical Physics 258 (2000) 73-96
9. "Excitons in quasi-one-dimensional crystalline perilene derivatives: band structure and relaxation dynamics", M. Hoffmann, T. Hasche, K. Schmidt, T.W. Canzler, V.M. Agranovich , K. Leo, International Journal of Modern Physics B, vol. 15 (2001) 3597.
- 10."Quantum confinement of self-trapped Frenkel excitons", V. M. Agranovich and A.M.Kamchatnov, Chemical Physics 245/1-3(1999)173-182
- 11."Organic and inorganic quantum wells in microcavity: Frenkel-Wannier-Mott hybridization and energy transformation", V. Agranovich, H. Benisty, C. Weisbuch, Solid State Comm.102(1997)631-636.
12. "Raman scattering in strongly coupled organic semiconductor microcavities", A.I.Tartakovskii, M. Emam-Ismail, D.G.Lidzey, M.S. Skolnik, D.D.C.Bradley, S.Walker, V.M.Agranovich, Phys.Rev.B 63 (R) 121302 (2001);
- 13."Experimental study of light emission from strongly coupled organic semiconductor microcavities following nonresonant laser excitation ",
- 14.D.G.Lidzey, A.M. Fox, M.D.Rahn, M.S.Skolnick, V.M.Agranovich, S.Walker , Phys.Rev.B 65(19)(2002)p.195312.
15. "Microcavity polaritons in materials with weak intermolecular interaction", V.M.Agranovich, M.L.Litinskaia, D.G.Lidzey, phys.stat.sol.(b)234 (2002)130-138.
- 16."Cavity polaritons in microcavities containing disordered organic semiconductors", V.M. Agranovich, M.L. Litinskaia, D.G. Lidzey, Phys. Rev. B 67 (2003), 085311



## Самоорганизация возбуждений в поле световой волны



Исследование явления самоорганизации в поле световой волны показало, что оно во многом сходно с фазовыми переходами. В процессе упорядочения происходит выбор нового состояния, поэтому возникают сильные флуктуации параметров системы. В случае фазовых переходов они проявляют себя в критической опалесценции. Наши исследования показали, что возникающая в процессе самоорганизации статическая поляризация при стационарных внешних условиях сильно флуктуирует во времени с универсальным спектром  $1/f$ . Вследствие этого флуктуируют все характеристики, связанные с этой поляризацией. Так как поляризация нарушает инверсную симметрию системы и наводит нелинейную восприимчивость второго порядка, разрешая тем самым генерацию второй гармоники, то сигнал на удвоенной частоте

также флуктуирует вместе с поляризацией, что является аналогом критических флуктуаций. В соответствии с теорией нами наблюдались сильные флуктуации второй гармоники, намного превышающими нормальный уровень шумов. Эти флуктуации отражают внутренние процессы, возникающие при самоорганизации системы. Измерение спектра дало  $1/f$  зависимость, характерную для самоорганизующихся систем.

Явление самоорганизации было использовано нами для изменения свойств стекла. Был предложен и осуществлен метод чисто оптического полинга (наведения статической поляризации) стекла. Вначале выпрямлением волн первой и второй гармоники Nd:YAG лазера на нелинейной восприимчивости третьего порядка создается затравочное статическое поле, изменяющееся в пространстве так, что выполняются условия фазового синхронизма. Затем действием одной из волн (первой или второй гармоники) или обеими вместе это поле в условиях самоорганизации усиливается, в результате чего возникает изменяющаяся в пространстве нелинейная восприимчивость второго порядка, обеспечивающая эффективную генерацию второй гармоники. Достигнутое фазовое согласование позволило нам наблюдать сигнал второй гармоники на серийном стекле тяжелый флинт, считающимся прозрачным в области первой и второй гармоник. Остаточное поглощение на локальных состояниях электронов в щели оказалось достаточным для наблюдения сигнала второй гармоники вследствие достигнутой высокой эффективности удвоения частоты.

### Литература

1. Антонюк, Б.П., Денисов, В.Н., Маврин, Б.Н., “Состояния с переносом заряда в силикатных волоконных световодах с примесью  $\text{GeO}_2$  и их роль в генерации второй гармоники”, Письма в ЖЭТФ **68** (1998) 737.
2. Antonyuk, B.P., Antonyuk, V.B., “Influence of external electric field on the second harmonic generation in Ge-doped silica fibres”, Phys. Lett. A **249** (1998) 113.
3. Antonyuk, B.P., Antonyuk, V.B., “Second harmonic generation in Ge-doped silica fibres: experiment and theory”, J. Mod. Opt. **45** (1998) 257.
4. Antonyuk, B.P., Antonyuk, V.B., “High efficient second harmonic generation in Ge-doped silica fibers”, Opt. Comm. **147** (1998) 143
5. Antonyuk, B.P. and Musichenko, S.F. “Positive feedback in response to static electric field in glasses under light pumping”, Physica Scripta **58**, (1998) 83
6. Antonyuk, B.P., Antonyuk, V.B. and Frolov A.A., “Charge transfer excitons in Ge-doped silica fibres and their response to static electric field”, Opt. Comm. **174** (2000) 427.
7. Antonyuk, B.P., “All optical poling of glasses”, Opt. Comm. **181** (2000) 191.

8. Antonyuk, B.P., Antonyuk, V.B., "Optical piston in glasses", J. Mod. Opt. (2001) **48** 573.
9. Антонюк, Б.П., Антонюк, В.Б., "Самоорганизация возбуждений в германосиликатных волоконных световодах и ее роль в генерации второй гармоники", УФН **171** (2001) 61.
10. Antonyuk, B.P. and Antonyuk, V.B., "Exciton self-organization in Ge-doped silica fibres and second harmonic" Fibre Technology, **4** (2001) 20.
11. Antonyuk, B.P., Novikova, N.N., Didenko, N.V. and Aktsipetrov, O.A., "All optical poling and second harmonic generation in glasses: theory and experiment", Phys. Lett. A (2001) **287** 161.
12. Antonyuk, B.P., Novikova, N.N., Didenko, N.V. and Aktsipetrov, O.A., "Light induced  $\chi^{(2)}$  nonlinear susceptibility and its  $1/\omega$  fluctuations in silica glasses", Phys. Lett. A (2002) **298** 405.
13. Antonyuk, B.P., "Light driven self-organization", Nova Science Publishers, Inc., NY (2003).
14. Монография "Light Driven Self-Organization" 2003. ISBN; 1-59033-776-X.

## Нелинейные волны



Построена последовательная теория дискретных солитонов в средах как с квадратичной, так и кубической нелинейностями. Открыты новые виды сильно локализованных возбуждений в дискретных нелинейных системах, и, в частности, светлые солитоны со скачком фазы в центре, квази-прямоугольные светлые солитоны, а также асимметричные темные солитоны и ударные волны с ненулевыми асимптотиками. Теория применена к описанию динамики возбуждений в нелинейных решетках, оптических импульсах в многоканальных волноводных системах и атомного Бозе-Эйнштейн конденсата в оптических решетках [1-7]. Результаты этого цикла работ частично представлены в обзоре [8], посвященном модуляционной неустойчивости

нелинейных волн в неоднородных и дискретных средах .

Развита теория распространения волн в средах с квадратичной нелинейностью при учете потерь и/или усиления. Показано существование новых светлых чирпированных локализованных и ударных волн с взаимно компенсированными затуханием и усилением. Исследована динамика двухчастотных уединенных волн в средах с флуктуирующими параметрами. В частности было показано, что флуктуации нелинейности индуцируют эффективные нелинейные потери. Теория объяснила различие в затухании первой и второй гармоник. Полученные аналитические формулы подтверждены прямыми численными расчетами полной системы нелинейных стохастических уравнений с частными производными [9-13].

Исследованы модуляционная неустойчивость нелинейных плоских волн и эволюция цепочки коротких импульсов в линиях связи с периодически встроенными полупроводниковыми усилителями. Показано, что существование стационарного второго импульса является необходимым и достаточным условием существования стационарной цепочки импульсов. Получено выражение для максимально возможной скорости передачи информации в такой линии связи [14,15].

Найдены новые семейства поверхностных и волноводных мод в структурах с квадратичной и кубической нелинейностью. В частности, моды имеющие в поперечном направлении форму светлых и темных солитонов, а также моды типа ударной волны обнаружены и исследованы. В случае квадратичной нелинейности показано существование симметричных мод в асимметричных системах. При построении некоторых мод использованы сингулярные решения нелинейных уравнений [16-21].



Исследовано совместное действие поляритонного эффекта и керровской нелинейности на распространение оптических импульсов. Показано существование различных солитонов огибающей вблизи поляритонной щели, свойства которых определяются несущей частотой. Так солитоны внутри и вне щели имеют разные зависимости скорости и амплитуды от их длительности [22].

Построена теория экспериментально открытого недавно явления “сверх-прохождения” света через нано-структурированные металлические плёнки. Усиленное прохождение связано с резонансным возбуждением поверхностных плазмон-поляритонов (ПП) и необязательно требует сквозных дырок через пленку. Из-за различной конфигурации полей ПП, только состояния ПП четных ветвей дисперсионной кривой участвуют в резонансном прохождении при нормальном падении света [23].

## Литература

1. A.Kobyakov, S.Darmanyan, E.Schmidt, F.Lederer. Dark Spatial Solitons in Discrete Cubic Media with Self- and Cross-Phase-Modulation. *Optical and Quantum Electronics* **30**, 795, 1998.
2. S. Darmanyan, A. Kobyakov, F. Lederer, and L. Vazquez. Discrete fronts and quasirectangular solitons, *Phys. Rev. B* **59**, 5994 (1999).
3. A. Kobyakov, S. Darmanyan, T. Pertsch, and F. Lederer. Stable discrete domain walls and quasirectangular solitons in quadratically nonlinear waveguide arrays, *J. Opt. Soc. Am. B*, **16**, 1737 (1999).
4. F. Lederer, S. Darmanyan, A. Kobyakov, Discrete Optical Solitons, in *Optical Solitons*, eds. W. Torruellas and S. Trillo, pp. 169-192, Springer 2001.
5. S. Darmanyan, A. Kobyakov, and F. Lederer. Asymmetric dark solitons in nonlinear lattices, *Zh. Exp. Theor. Phys*, **120**, 486-492 (2001); *JETP* **93**, 429-434 (2001)
6. F. Lederer, S. Darmanyan, and A. Kobyakov, Discrete Solitons in Nonlinear Waveguide Arrays, In *Nonlinearity and Disorder: Theory and Applications*, NATO Science Series: Mathematics, Physics and Chemistry, **45**, 131- 158, Kluwer Academic Publishers, 2001.
7. F. Kh. Abdullaev, B. B. Baizakov, S. A. Darmanyan, V. V. Konotop, and M. Salerno, Nonlinear excitations in arrays of Bose-Einstein condensates, *Phys. Rev. A* **64**, 043606, (2001).
8. F. Kh. Abdullaev, S. A. Darmanyan, and J.Garnier, Modulation instability of electromagnetic waves in inhomogeneous and discrete media. *Progress in Optics* **44**, 303-363 (2002)
9. S.Darmanyan, A.Kamchatnov, F.Lederer. Optical shock waves in media with quadratic nonlinearity. *Phys.Rev.E*, **58**, No.4, R4120, 1998.
10. S. Darmanyan, A. Kobyakov, and F. Lederer. Quadratic solitons in nonconservative media, *Opt. Lett.* **24**, 1517(1999).
11. F.Abdullaev, S.Darmanyan, A.Kobyakov, E.Schmidt, F.Lederer. Evolution of Spatial Solitons in Quadratic Media with Fluctuating Parameters. *Opt. Comm.* **168**, 213-218, 1999.
12. S. Darmanyan, L.Crasovan, and F. Lederer. "Double-hump solitary waves in quadratically nonlinear media with loss and gain" *Phys.Rev.E* **61**, 3267 (2000).
13. A. Kobyakov, F. Kh. Abdullaev, S. A. Darmanyan and F. Lederer, Spatial solitons in random quadratic media. In *Nonlinearity and Disorder: Theory and Applications*, NATO Science Series: Mathematics, Physics and Chemistry, **45**, 37-54, Kluwer Academic Publishers, 2001.
14. M.Goles, S. Darmanyan, G. Onishchukov, A.Shipulin, Z. Bakonyi, V. Lokhnigin and F. Lederer. "Modulational instability in a transmission system with semiconductor optical amplifiers and in-line filters", *Opt. Lett.* **25**, 293 (2000).
15. S. Darmanyan, C.Knöll, and F. Lederer, Pulse train in transmission lines with semiconductor amplifiers – an analytical study, *Optics Comm.* **197**, 61 (2001).
16. S. Darmanyan, E. Popov, M. Neviere. Nonlinear prism coupler: approximate theory and comparison with rigorous analysis, *J. El-Mag. Waves and Appl.* **14**, 383-399 (2000).

17. S. Darmanyan, M. Neviere. Eigenmodes of waveguides with quadratic nonlinearity, *Opt.Comm.* **176**, 231 (2000).
18. S. Darmanyan and M. Neviere. Dichromatic nonlinear eigenmodes in slab waveguide with quadratic nonlinearity, *Phys. Rev. E* **63**, 036613 (2001).
19. S. Darmanyan and M. Neviere. Surface waves at the interface of quadratic nonlinear media, *Phys. Lett. A*, **281**, 260-264 (2001).
20. M. Neviere and S. Darmanyan, Nonlinear eigenmodes in quadratic film waveguides, In *Nonlinearity and Disorder: Theory and Applications*, NATO Science Series: Mathematics, Physics and Chemistry, **45**, 423-434, Kluwer Academic Publishers, 2001.
21. S. Darmanyan, A. Kamchatnov, and M. Neviere, TE-polarized guided modes in layered structures with  $\chi^{(2)}$  nonlinearity, *Nonlinear Optics* **28**, 183-195, (2002).
22. S. Darmanyan, A. Kamchatnov, and M. Neviere, Polariton effect in nonlinear pulse propagation. *Zh. Eks. Teor. Fiz.* **123** 997 (2003); *JETP* **96**, 876 (2003).
23. S. Darmanyan and A. Zayats. Light tunneling via resonant surface plasmon polariton states and the enhanced transmission of periodically nanostructured metal films: An analytical study. *Phys. Rev. B* **67**, 035424 (2003).

### Ферми-резонансные моды и солитоны



1. В 1998-2003 годах были продолжены исследования молекулярных кристаллических структур с ферми-резонансным взаимодействием между возбуждениями, находящимися по разные стороны от поверхностей раздела. Динамика взаимодействия ферми-резонансных солитонов, распространяющихся вдоль двух интерфейсов в трехслойной системе, была рассмотрена в [2]. Найдены связанные состояния солитонов и вычислены частоты колебаний и другие характеристики их относительного движения. Сильно локализованные нелинейные моды в кристаллах с внутримолекулярным ферми-резонансом были исследованы в [16]. В трехмерных кристаллах были найдены новые состояния, не имеющие аналогов в кристаллических системах меньшей размерности. Ферми-резонансные моды в многослойных

системах были изучены в [25] для случая, когда имеется ферми-резонанс между тремя различными возбуждениями. Найдены условия существования таких мод и рассчитаны их основные характеристики.

2. Асимптотическая теория формирования солитонов из интенсивного начального импульса развита в [18,23] для широкого класса нелинейных волновых уравнений, имеющих многочисленные приложения в физике. Параметры и число солитонов могут быть вычислены с помощью обобщенного правила квантования Бора-Зоммерфельда для ассоциированной в рамках метода обратной задачи рассеяния линейной спектральной задачи. Спектр линейной задачи зависит от нескольких функций, определяющих начальные условия, а число солитонов равно числу собственных значений. Развитый метод подтвержден численным моделированием и применен в [26] к актуальной задаче о формировании темных солитонов в бозе-эйнштейновском конденсате.

### Литература.

1. A.M. Kamchatnov, V.G. Nosov, Change of nuclear moment of inertia at the number of neutrons

- N=98 and isotopic shift of atomic levels, *Yad. Fiz.* 61, 17-20, 1998 [*Phys. Atomic Nucl.* 61, 13-16, 1998].
2. V.M. Agranovich, S.A. Darmanyan, K.I. Grigorishin, A.M. Kamchatnov, Th. Neidlinger, and P. Reineker, Dynamics of Fermi resonance solitary waves propagating along two interfaces, *Phys. Rev.* B57, 2461-2467, 1998.
  3. V.M. Agranovich, A.M. Kamchatnov, H. Benisty, C. Weisbuch, Nonlinear pulse propagation along quantum well in a semiconductor microcavity, in *Beam Shaping and Control with Nonlinear Optics*, Eds. F. Kajzar and R. Reinisch, NATO ASI Series, Series B: Physics, Vol. 369, Plenum Press, New York and London, 1998, p.133.
  4. A.M. Kamchatnov, S.A. Darmanyan, F. Lederer, Formation of solitons on a sharp front of the pulse in optical fiber, *Phys. Lett.* A245, 259-264, 1998.
  5. H. Steudel, C. Figueira de Morrison Faria, M.G.A. Paris, A.M. Kamchatnov, O. Steuernagel, Second harmonic generation: the solution for an amplitude-modulated initial pulse, *Optics Commun.* 150, 363-371, 1998.
  6. S. Darmanyan, A. Kamchatnov, and F. Lederer, Optical shock waves in media with quadratic nonlinearity, *Phys. Rev.* E58, No.4, R4120-23, 1998.
  7. V.M. Agranovich, D.M. Basko, A.D. Boardman, A.M. Kamchatnov, T.A. Leskova, Surface solitons due to second order cascaded nonlinearity, *Optics Commun.* 160, 114-118, 1999.
  8. A.M. Kamchatnov and H. Steudel, On the evolution of an optical pulse with initial chirp in a nonlinear fiber at the zero dispersion point, *Optics Commun.* 162, 162-168, 1999.
  9. V.M. Agranovich and A.M. Kamchatnov, Quantum confinement and superradiance of one-dimensional self-trapped Frenkel excitons, *Chem. Phys.* 245, 175-184, 1999.
  10. A.M. Kamchatnov and V.G. Nosov, Nonconservation of the quantum number K and phase transitions in rapidly rotating nuclei, *Yad. Fiz.* 63, 440-443, 2000 [*Phys. Atomic Nucl.* 63, 373-376, 2000].
  11. A.M. Kamchatnov, Decay of an optical pulse in a nonlinear fiber at the zero dispersion point, *Optics Commun.* 178, 333-337, 2000.
  12. V.M. Agranovich and A.M. Kamchatnov, Quantum confinement and superradiance of self-trapped excitons from 1D J-aggregates, in *Multiphoton and Light Driven Multielectron Processes in Organics: New Phenomena, Materials and Applications*, Eds. F. Kajzar and V.M. Agranovich, Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, 2000, pp. 109-122.
  13. H. Steudel, C. Figueira de Morrison Faria, A.M. Kamchatnov, M.G.A. Paris, The inverse problem for second harmonic generation with amplitude-modulated pulses, *Phys. Lett.* A276, 267-271, 2000.
  14. V.M. Agranovich, O.A. Dubovsky, A.M. Kamchatnov, Kinematic Frenkel gap biexciton in one-dimensional structures, *Synthetic Metals* 116, 293-295, 2001.
  15. V.M. Agranovich, O.A. Dubovsky, A.M. Kamchatnov, Charged Frenkel biexcitons in organic molecular structures, *JETP Lett.* 73, 341--343, 2001.
  16. V.M. Agranovich, O.A. Dubovsky, A.M. Kamchatnov, P. Reineker, Threshold behavior of strongly localized nonlinear modes in crystals with Fermi resonance interaction, *Mol. Cryst. Liquid Cryst.* 355, 25-40, 2001.
  17. A.M. Kamchatnov, On the Baker-Akhiezer function in the AKNS scheme, *J. Phys. A* 34, L441--L446, 2001.
  18. A.M. Kamchatnov, R.A. Kraenkel, and B.A. Umarov, On asymptotic solutions of integrable wave equations, *Phys. Lett. A* 287, 223-234, 2001.
  19. A.M. Kamchatnov, Wavebreaking in hydrodynamics of the defocusing NLS equation, in *Nonlinearity and Disorder: Theory and Applications*, Eds. F. Abdullaev, O. Bang and P.O. Sorensen, Kluwer Academic Publishers, Boston, 2001, pp.255-271.
  20. S.A. Darmanyan, A.M. Kamchatnov and M. Neviere, TE-polarized guided modes in layered structures with  $\chi^{(2)}$  nonlinearity, *Nonlinear Optics*, 28, 183-195, 2001.
  21. A.M. Kamchatnov and R.A. Kraenkel, On the relationship between 2x2 matrix and second-order scalar spectral problems for integrable equations, *J. Phys. A: Math. Gen.* 35, L13-L18, 2002.
  22. S.B. Cavalcanti, A.M. Kamchatnov, R.A. Kraenkel, B.A. Umarov, Periodic waves and solitons in

- nonlinear fiber with resonant impurities, *J. Mod. Optics*, 49, 2183-2193, 2002.
23. A.M. Kamchatnov, R.A. Kraenkel, B.A. Umarov, Asymptotic soliton train solutions of the defocusing nonlinear Schroedinger equation, *Phys. Rev. E* 66, 036609, 2002.
24. A.M. Kamchatnov and M.V. Pavlov, On generating functions in the AKNS hierarchy, *Phys. Lett. A* 301, 269-274, 2002.
25. V.M. Agranovich, A.M. Kamchatnov, R.W. Munn, Fermi resonance interface modes in organic multilayer structures, *Chem. Phys.* 182, 399-408, 2002.
26. V.A. Brazhnyi, A.M. Kamchatnov, V.V. Konotop, On creation and evolution of dark solitons in Bose-Einstein condensates, *cond-mat/0301319*
27. A.M. Kamchatnov, On Whitham theory for perturbed integrable equations, *solv-int/0302027*

## Спинтроника



Значительная часть работ была посвящена теоретическому исследованию спин-зависимых явлений в полупроводниковых соединениях АIII-BV. Главным образом изучалось влияние спин-орбитального взаимодействия на транспортные и оптические свойства носителей в квантовых ямах и квантовых точках [1-9]. В частности, были исследованы квантовые осцилляции транспортных параметров, обусловленные набегом спиновой геометрической фазы в мезоскопических 2-мерных кольцах [3,9]. Был предложен новый метод инжекции спинового тока при рекомбинации в полупроводниковой квантовой яме встречных потоков электронов и дырок [8]. Предсказано, что релаксация спиновой плотности электронов может быть сильно замедлена в особом роде модах диффузии в узких 2-х мерных каналах [6].

Были проведены исследования термоэлектрических свойств полупроводниковых микроструктур [10-13]. В частности, показано, что существует область параметров, где становится возможным самоохлаждение полупроводниковой квантовой ямы при излучательной рекомбинации носителей в ней [10].

Рассмотрено нелинейное рессеяние света в мутной среде. Предсказано появление пика в малоугловом рассеянии из-за флуктуаций плотности фотонов [14].

## Литература

1. Mal'shukov A.G., Chao K.A., and Willander M. The Hall effect in a magnetic field parallel to interfaces of a III-V semiconductor quantum well. *Phys.Rev. B* **57**, R2069, (1998)
2. Brataas A., Gudmundsson V., Mal'shukov A.G., Chao K.A. Collective intersubband spin-density excitations in quantum wire in a magnetic field, *J. Phys.: Condens. Matter* **10**, 7701, (1998)
3. Mal'shukov A.G., Shlyapin V.V., Chao K.A. Effect of the spin-orbit geometric phase on the spectrum of Aharonov-Bohm oscillations in a semiconductor mesoscopic ring. *Phys.Rev. B* **60**, R2161, (1999)
4. Mal'shukov A.G., Froltsov V.A., Chao K.A. Crystal anisotropy effects on the weak-localization magnetoresistance of a III-V semiconductor quantum well in a magnetic field parallel to interfaces. *Phys. Rev. B* **59**, 5702, (1999)
5. Froltsov V.A., Mal'shukov A.G., Chao K.A. Polarization dependence of the resonant Raman scattering from electrons in a spin-split subband of a III-V semiconductor quantum well. *Phys. Rev. B*, **60**, 14255, (1999)

6. Mal'shukov A.G., Chao K.A. Waveguide diffusion modes and slowdown of D'yakonov-Perel' spin relaxation in narrow 2-D semiconductor channels. *Phys. Rev. B*, **61**, R2413, (2000)
7. Froltsov V.A., Mal'shukov A.G., Chao K.A. Spin-orbit interaction and spin-charge interference in resonant Raman scattering from III-V semiconductor quantum wells. *Phys. Rev. B*, **64**, 073309 (2001)
8. A. G. Mal'shukov, K. A. Chao, Optoelectric spin injection in semiconductor heterostructures without a ferromagnet. *Phys.Rev.B* **65**, 241308 (2002)
9. A. G. Mal'shukov, V.V. Shlyapin, K. A. Chao, Quantum oscillations of spin current through a III-V semiconductor loop, *Phys.Rev.B* **66**, 081311 (2002)
10. Mal'shukov A.G., Chao K.A. Opto-Thermionic Refrigeration in Semiconductor Heterostructures. *Phys. Rev. Lett.* **86**, 5570 (2001)
11. A. G. Mal'shukov, M. Zhongshi, V. B. Antonyuk, K. A.Chao, Multilayer thermionic transport in semiconductor superlattices. *Solid State Communication* **119**, 563 (2001)
12. V. B. Antonyuk, A. G. Mal'shukov, Z. Ma, K. A. Chao, Thermionic figure of merit for parallel transport in superlattices, *Applied Phys. Lett.* **79**, 3791 (2001)
13. M. Larsson, V. B. Antonyuk, A. G. Mal'shukov, Z. Ma, K. A. Chao, Thermionic current reversal, *J. Phys. A: Math. Gen.* **35**, L531 (2002)
14. Mal'shukov A.G., Mahan G.D. Nonlinear forward scattering of light in opaque media, *Phys.Rev. B*, **57**, 7701, 1998

### Низкоразмерные электронные системы



1. Исследована высокочастотная асимптотика корреляционной функции уровней энергии электрона в неупорядоченных двумерных системах. Обнаружена неожиданная универсальность корреляций: они выражаются через Эйлерову характеристику поверхности, то-есть, зависят от топологии системы [5].
2. В серии работ [8, 11, 12] подробно исследована проблема нелинейного отклика мезоскопических систем на переменное внешнее поле. Показано [8], что динамическое (в модели невзаимодействующих электронов) описание отклика страдает сингулярностями, указывающими на неадекватность подхода. Развита последовательная кинетическая теория нелинейного отклика электронов, 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 [12]. 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 независящего 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 [11].

3. Исследована классическая диффузия в системах с неровными границами; найдены классические аналоги квантовых эффектов слабой локализации [10].
4. Предложена диффузионная модель для описания движения межфазных границ при химических реакциях в твердых телах [1].
5. Предложена модель гистерезиса, обнаруженного в циклотронном резонансе двумерного электронного газа в GaAs/AlGaAs структурах. Модель учитывает изменения электронной плотности и описывает основные черты наблюдаемых явлений [6].
6. Предложена решеточная модель для описания электронно-дырочного газа в сильно неупорядоченных двойных квантовых ямах; показано, что сильный беспорядок подавляет экситонную фазу [2,4].

7. Развѣт формализм, позволяющий описать локализованное на выделенном центре взаимодействие частицы (электрона, экситона) с фононами [7,9]; получено точное решение модели генерации второй гармоники для экситона с переносом заряда, взаимодействующего с фононами [9]. Исследована оптическая нелинейность полупроводниковой “квантовой точки” с органическим покрытием.

#### Литература

- [1] V.I. Yudson, M. Schulz, and S. Stepanow, "Dynamics and roughness of reaction fronts in heterogeneous solid-state chemical reactions"; *Phys.Rev. E* **57**, 5053-5059 (1998).
- [2] V.I. Yudson and M. Singh, "A lattice gas model for electron-hole coupling in disordered media"; *Phys.Rev. B* **58**, 16202-16208 (1998).
- [3] A.Engelmann, V.I. Yudson, and P. Reineker, "Enhanced optical nonlinearity of hybrid excitons in an inorganic semiconducting quantum dot covered by an organic layer"; *Phys.Rev. B* **57**, 1784-1790 (1998).
- [4] W. Lau, V.I. Yudson, and M. Singh, "Study of the lattice-gas model of electron-hole coupling in disordered semiconductors"; *Phys.Lett. A* **250**, 196-200 (1998).
- [5] V.E. Kravtsov and V.I. Yudson, "Topological Spectral Correlations in 2D Disordered Systems"; *Phys.Rev.Lett.* **82**, 157 (1999).
- [6]. B.M. Ashkinadze and V.I. Yudson, "Observation of a Hysteretic Microwave Cyclotronlike Resonance in a Laterally Confined Two-Dimensional Electron Gas"; *Phys.Rev.Lett.*, **83**, 812 (1999).
- [7] V. I. Yudson and M. Singh, "Electron Scattering at a Center with Phonon Degrees of Freedom"; *Phys.Lett. A* **264**, 198-201 (1999).
- [8] ] V.I. Yudson, E. Kanziiper, and V.E. Kravtsov, "Limits of the dynamical approach to the nonlinear response of mesoscopic systems"; *Phys.Rev. B*, **.64**, 045310 (2001).
- [9]. P. Reineker and V.I. Yudson, "Second Harmonic Generation by Charge-Transfer Excitons Interacting with Phonons"; *Phys.Rev. B* **63**, 233101 (2001).
- [10] V.I. Yudson and P. Reineker, "Classical diffusion in channels with a spatially varying cross section"; *Phys.Rev. E* **64**, 031108 (2001).
- [11] V.I. Yudson, "Variance of direct current in mesoscopic rings" *Phys.Rev. B* **65**, 115309 (2002).
- [12] V.I. Yudson and V.E. Kravtsov, "Electron kinetics in isolated mesoscopic rings driven out of equilibrium"; *Phys.Rev. B* **67**, 155310 (2003)



## ЛАБОРАТОРИЯ СПЕКТРОСКОПИИ НАНОСТРУКТУР



Исследование низкоразмерных электронных систем в наноструктурах, квантовых точках, квантовых проводах, кластерах является сейчас одной из самых горячих областей физики. Связано это, с одной стороны, с перспективностью этих систем как элементной базы нового поколения приборов микроэлектроники. С другой стороны, эта область оказалась удивительно богатой для фундаментальной науки. Широко известны, например, замечательные открытия квантованного целочисленного и дробного эффекта Холла, для объяснения которых оказалось недостаточно стандартных методов теории многих частиц, а потребовалось введение довольно глубоких топологических понятий и т.п. В двумерных системах в магнитных полях наряду с иерархией несжимаемых квантовых жидкостей, связанных с квазичастицами с

нецелым электрическим зарядом, были недавно открыты фазы, которые, видимо, связаны с квантовой кристаллизацией электронов. Именно в этой области работает лаборатория Ю.Е.Лозовика. Лабораторию возглавляет проф. Ю.Е.Лозовик. В лабораторию входят две научные группы (теория и компьютерное моделирование наноструктур — рук. Ю.Е.Лозовик и экспериментальная группа — старший научный сотрудник С.П.Меркулова). Вместе с аспирантами и студентами в работе лаборатории участвуют в настоящее время 26 человек. Сотрудники лаборатории занимаются теорией, компьютерным моделированием и экспериментальными исследованиями наноструктур — основами будущей нанoeлектроники и нанооптики. В лаборатории занимаются и рядом фундаментальных вопросов теории: сверхтекучестью экситонов, композитными фермионами, квантовыми кластерами и кристаллами, квантовой механикой частиц с дробной статистикой, квантово-электродинамическими процессами в оптических микрополостях и т.п.

Работа ведется также по ряду направлений нанооптики, нанотехнологии, спектроскопии наноструктур, физики сверхбыстрых процессов, инициированных сверхкороткими лазерными импульсами, физики кластеров и новых кластерных материалов, наномеханики и мезоскопической физики.

Принципом работы лаборатории является сочетание аналитических расчетов, использующих возможности современного теоретического аппарата, и математического моделирования методами молекулярной динамики, Монте-Карло, квантового Монте-Карло, квантовой молекулярной динамики. 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 и поиска оптимальных параметров для проводимых в группе С.П.Меркуловой физических экспериментов по нанооптике и нанотехнологии. Сотрудниками лаборатории выполнено более 400 научных работ (в том числе ряд обзоров и коллективных монографий), защищено в общей сложности около 30 кандидатских диссертаций (рук. Ю.Е.Лозовик).



Работа лаборатории выполняется в сотрудничестве с лабораторией спектроскопии ультрабыстрых процессов и другими лабораториями ИСАН, МГУ, ИОФРАН, а также с Гумбольдовским Университетом Берлина, Университетом Гетеборга, Университетом Беркли.

### ***Нанооптика и нанолитография***

В лаборатории предложена и осуществлена 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 однопучковом и двухпучковом случае. Изучена визуализация поверхностных плазмонов с помощью сканирующего оптического акустического микроскопа.

В лаборатории предложен новый метод оптических измерений с 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  $\lambda$  - длина волны).

Изучены кавитационные процессы и самоорганизация при лазерном воздействии на вещество. 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. Изучены свойства фотонных кристаллов с металлическими элементами.

Предсказано аномальное подавление рассеяния электромагнитных волн от системы частиц с магнитным покрытием. Построена теория сканирующей емкостной микроскопии.

Изучено рассеяние света назад в неупорядоченной квазидвумерной системе.

### **Квантовая электродинамика микрополости. Фемтосекундная спектроскопия микрополости.**

Рассмотрено управление лэмбовским сдвигом атома в резонаторе. Предсказан новый эффект – бесфотонное возбуждение атома в нестационарной микрополости, обусловленное неадиабатической модуляцией лэмбовского сдвига нестационарными нулевыми колебаниями (динамический эффект Лэмба). Впервые количественно рассчитан нестационарный эффект Казимира ---возникновение фотонов в вакууме внутри резонатора при схлопывании нейтральных стенок. Рассчитаны статистические свойства излучения, его угловое распределение и интенсивность. Предложена реалистическая схема эксперимента по обнаружению рождения фотонов с использованием фемтосекундных лазерных импульсов, индуцирующих сверхбыстрое возникновение электронно-дырочной плазмы в первоначально

прозрачной полупроводниковой пленке, играющей роль "мгновенно" возникающей стенки резонатора. Проанализирована природа наблюдающегося экспериментально сверхбыстрого переключения мод полости в системе пленка полупроводника – металл.

### **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.. 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 лондговской 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. Работы по данной тематике ведутся в тесном сотрудничестве с Гумбольдтовским Университетом Берлина, Университетом Гетеборга, Университетом Беркли, МГУ, Институтом химической физики РАН и лабораторией спектроскопии сверхбыстрых процессов ИСАН.

### ***Оптика и электронные свойства наноструктур***

**Двухкомпонентные системы.** Рассмотрены спектры экситонов и биэкситонов в связанных квантовых ямах и их поведение в сильных магнитных полях. Предложена и осуществлена экспериментально инженерия закона дисперсии межямных экситонов и управление люминесценцией с помощью параллельного магнитного поля. Это дало возможность впервые измерить закон дисперсии экситонов (с помощью флуоресценции) и

определить экспериментально зависимость массы экситона от магнитного поля. Показано, что в сильных магнитных полях, в согласии с теорией, эффективная масса магнитоэкситона определяется связью движения центра масс и внутренней структуры и становится существенно больше, чем сумма зонных масс электрона и дырки. Изучена скачкообразная перестройка экситона в слабых магнитных полях с ростом его импульса.

Были проанализированы различные фазовые состояния и фазовая диаграмма системы непрямых экситонов и магнитоэкситонов в связанных квантовых ямах, в частности, предсказаны свойства фазы сверхтекучей экситонной жидкости и экситонного кристалла. Исследованы магнитные свойства и эффекты типа эффекта Джозефсона (в несверхпроводящей системе!) в связанных квантовых ямах. Обнаружено, что в магнитных полях, меньших критического, система является слабым диамагнетиком. В полях, больших критического, вихри этого поля проникают в пространство между ямами. Эти и более ранние наши работы открыли интересную новую физику в экситонной системе в квантовых ямах. Сейчас в этой области получены весьма интересные экспериментальные результаты (В.Б.Тимофеевым с соавт., Л.В.Бутовым и Д.Чемлой, Сноуком и др.). Наши исследования в этой области ведутся сейчас в сотрудничестве с Беркли и ИФТТ РАН. Рассмотрено экситонное поглощение в квазидвумерных неоднородных системах в сильном поперечном магнитном поле  $H$ . Вычислен коэффициент экситонного поглощения для случайных полей в одиночной и связанных квантовых ямах. В области сильных магнитных полей коэффициент поглощения убывает с ростом  $H$  в согласии с экспериментом. Рассчитаны транспортные времена и длины свободного пробега магнитоэкситона в квантовой яме, а также пространственно прямого и непрямого магнитоэкситона в связанных квантовых ямах в поле случайного потенциала, обусловленного флуктуациями толщины квантовых ям или случайным распределением примесных центров в квантовых ямах. Проанализирована слабая локализация составных частиц-прямых и непрямых экситонов и магнитоэкситонов в случайных полях.

Рассмотрено влияние неупорядоченности на бозе-конденсацию и сверхтекучесть квазидвумерных экситонов. Интересно, что они подавляются в разной степени. Рассмотрена слабая локализация экситонов Ванье-Мотта и плазмонов в неупорядоченных полупроводниках.

. Предсказана инициированная МП диссоциация и перестройка основного состояния биэкситона.

Развита теория (однослойных) двумерных электронно-дырочных систем в сильных магнитных полях (МП). В рамках этой теории впервые проведен детальный диаграммный анализ многочастичной системы с макроскопическим вырождением. В этой теории получен неожиданный результат о том, что система магнитоэкситонов произвольной плотности на данном уровне Ландау является, в силу симметрии взаимодействия, идеальным газом небозевских экситонов. Этот результат продемонстрирован в рамках двух подходов – диаграммного и операторной алгебры (т.е. получено точное решение этой многочастичной квантовой задачи!). Эти работы были впоследствии неоднократно подтверждены теоретическими и экспериментальными исследованиями.

Изучены спектр, фазовая диаграмма и термодинамические свойства системы с учетом конечности магнитного поля.

Развита теория двумерных электронно-дырочных систем с пространственно - разделенными электронами и дырками в сильных магнитных полях. В частности, в разреженной системе задача может быть сведена к системе разреженных бозонов в отсутствие поля, но с массами, зависящими от поля, и перенормированным, зависящим от поля взаимодействием. Изучен квантовый переход газ-жидкость в экситонной системе с ростом  $D$ . Вычислена температура перехода Костерлица-Таулеса в сверхтекучее состояние с ростом  $D$ . Для анизотропной электронно-дырочной системы в связанных квантовых ямах

рассмотрен квантовый переход Мотта металл-диэлектрик. Установлена нестабильность основного состояния системы взаимодействующих не прямых экситонов в пленке сверхрешетки с чередующимися слоями электронов и дырок. Стабильной системой в последнем случае является система не прямых квазидвумерных биекситонов, состоящих из не прямых экситонов с противоположно направленными электрическими дипольными моментами. Вычислены радиус и энергия связи не прямых экситонов. Изучен спектр коллективных возбуждений разреженной системы квазидвумерных не прямых биекситонов, взаимодействующих как электрические квадруполь. Проанализирована плотность сверхтекучей компоненты и температура перехода Костерлица-Таулеса в сверхтекучее состояние в системе не прямых биекситонов.

Рассмотрена нестабильность двухслойной системы композитных фермионов (при половинном факторе заполнения в каждом слое) относительно спаривания. Проанализировано 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.

Изучена квантовая и нелинейная оптика когерентной фазы экситонов. Предсказано наличие угловой корреляции фотонов при когерентной рекомбинации двух или нескольких экситонов, которая может быть изучена в экспериментах типа Хенбери Брауна-Твисса. Предсказано индуцированное рассеяние света назад от когерентной фазы экситонов, аномальное прохождение. Предсказан также ряд новых многофотонных эффектов. Наблюдение этих эффектов может служить экспериментальным критерием когерентности экситонной фазы.

**Однокомпонентные системы.** Предсказана и подробно изучена в микроскопическом и феноменологическом подходах инициированная МП квантовая кристаллизация двумерной (2D) системы электронов в полупроводниках и влияние на нее сил изображения. Рассмотрен квантовый эффект Холла в дрейфовом приближении. Выявлена связь квантованной холловской проводимости с геометрическим топологическим инвариантом в системе. Предсказан дрейфовый резонанс в 2D системе электронов в сильных МП, связанный с резонансным возбуждением дрейфовых граничных токов вдоль внутренних и внешних границ системы. Построена последовательная микроскопическая теория коллективных возбуждений в квантовых точках и массивов квантовых точек в сильных магнитных полях. Изучен динамический отклик системы 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 на уровне Ферми. Рассмотрена микроскопическая теория краевых магнитоплазмонов, основанная на обобщенном приближении хаотических фаз.

Построена теория композитных фермионов с двумя квантами потока в анизотропной системе при половинном заполнении уровня Ландау. Показано, что форма ферми-контура композитных фермионов – такая же, как и в системе электронов в отсутствие поля, однако законы дисперсии – существенно иные. 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 отсутствие поля. Выведено уравнение состояния для разреженной системы анионов – квазичастиц с дробной статистикой.

Изучена спиновая поляризация композитных фермионов. Теория хорошо согласуется с экспериментом.

В рамках конформно-инвариантной теории предложена классификация квазичастиц и бесщелевых краевых возбуждений системы в режиме дробного квантового эффекта Холла. Указана возможность существования новой, неабелевой статистики возбуждений.

### *Мезоскопические кластеры. Квантовые точки, “молекулы” и “кристаллы” из квантовых точек*

В работах лаборатории впервые исследованы мезоскопические электронные кристаллы и сильно-коррелированные состояния электронов в квантовых точках. Кулоновские мезоскопические кластеры, как показывает компьютерное моделирование, и аналитические расчеты обладают в квазиклассическом режиме оболочечной кристаллической структурой., напоминающей гипотетический трехмерный или двумерный атом Томсона с соответствующей “Периодической таблицей”, и специфика их плавления. С ростом температуры и/или нулевых колебаний (например, при изменении плотности) в кластерах происходят фазовые переходы. Интересно, что в мезоскопическом 2D и 3D кластере плавление носит многостадийный характер: сначала происходит взаимное ориентационное плавление соседних “кристаллических” оболочек (одна или несколько оболочек, оставаясь “кристаллическими”, начинают вращаться друг относительно друга). Затем, при существенно больших значениях управляющих параметрах (см. выше) – исчезновение оболочечной структуры и исчезновение “кристаллического” порядка внутри оболочек – переход в ферми-жидкость (см. Рис.3 для иллюстрации такого квантового плавления). 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.

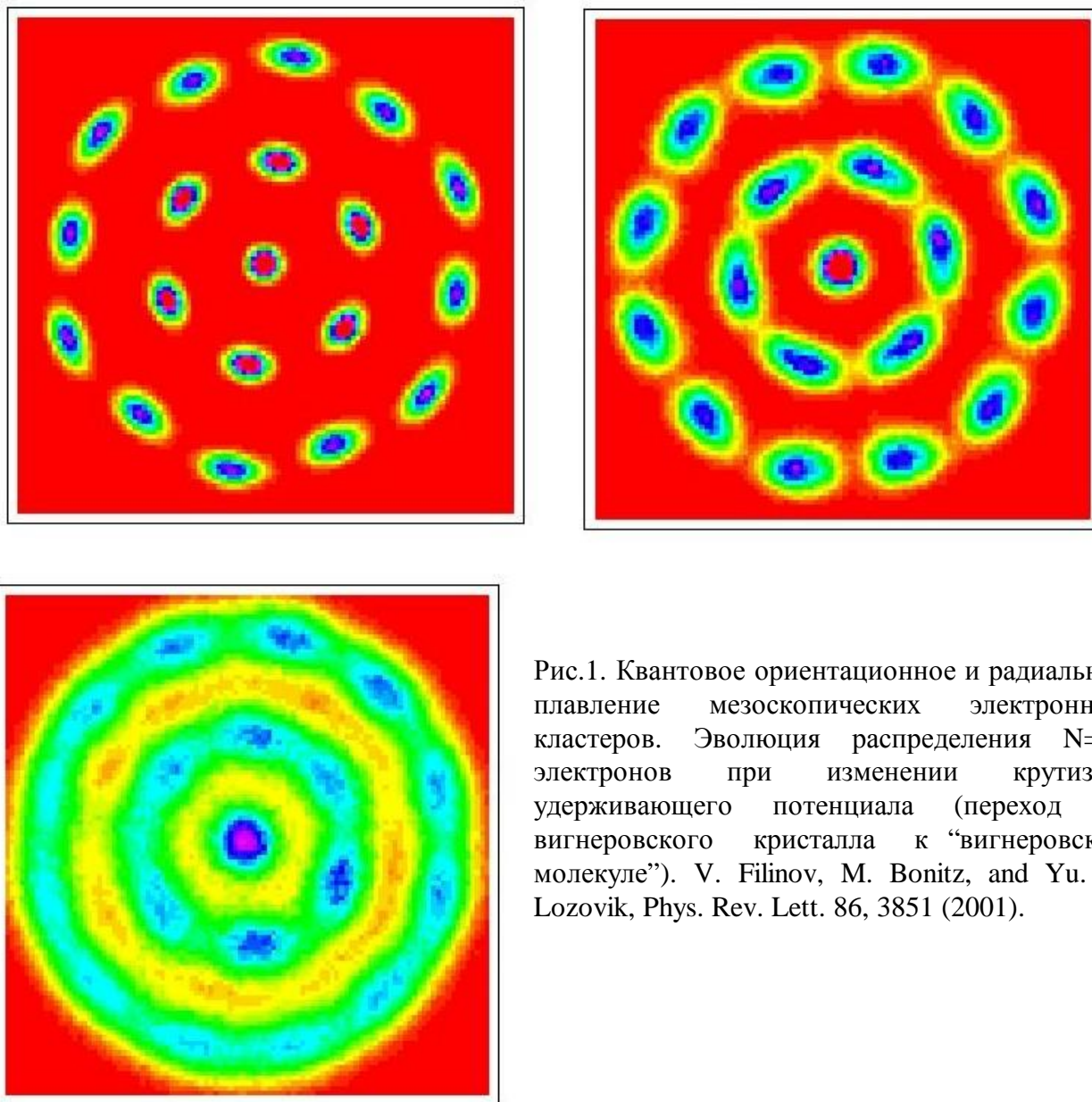


Рис.1. Квантовое ориентационное и радиальное плавление мезоскопических электронных кластеров. Эволюция распределения  $N=19$  электронов при изменении крутизны удерживающего потенциала (переход от вигнеровского кристалла к “вигнеровой молекуле”). V. Filinov, M. Bonitz, and Yu. E. Lozovik, Phys. Rev. Lett. 86, 3851 (2001).

Детально изучено влияние мезоскопических эффектов (числа электронов в квантовой точке) на фазовую диаграмму системы. 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. Аналогичные эффекты – оболочечная структура, многостадийное плавление- обнаружено и для мезоскопических кластеров иной природы- дипольных, мезоскопической системы вихрей в сверхпроводящем островке и т.п. Развита топологическая классификация сферических кластеров.

Для расчетов квантово-механических кулоновских кластеров были использован также метод мнимого времени, вариационный расчет, а также непертурбативные методы — разложение по безразмерному квантовому параметру, а также по обратной размерности пространства. Проанализирована перестройка спектра при изменении параметров системы. Рассчитаны “молекулы” из квантовых точек – вертикально- и горизонтально связанные

квантовых точки, их спектры, предсказано спонтанное намагничение -спиновая перестройка при изменении параметров структуры. Изучены мезоскопические сильно-коррелированные системы электронов. Рассчитаны экситоны и трионы в квантовых точках. Построена микроскопическая теория низколежащих коллективных возбуждений квантовых точек в сильных магнитных полях, учитывающая бесконечную подпоследовательность диаграмм по кулоновскому взаимодействию одного порядка по малому безразмерному параметру задачи.

### ***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.

### ***Наномеханика. Нанотрубки. Новые кластерные материалы***

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 уже недавно 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.

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.



### ***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, удается 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 систем, описываемых XY-моделью. Описан фазовый переход спираль-клубок для вихрей. Обнаружена связь между фрактальной размерностью существенных топологических возбуждений и критическими индексами фазовых переходов.

### ***Атомы и молекулы***

В широком диапазоне магнитных полей (МП) 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.

### ***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 непerturbативный по взаимодействию метод расчета связанных состояний в квантовых системах с помощью  $\epsilon$ -разложения вблизи пространственной размерности  $d=2$ , а также с помощью  $1/d$ -разложения.

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. Yu.E. Lozovik, 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).
2. Yu.E. Lozovik, A.V. Minogin, A.M. Popov, Nanomachines Based on Carbon Nanotubes, Phys. Lett. A 313, No1-2, 112 – 121(2003).
3. A.V. Filinov, M. Bonitz, and Yu.E. Lozovik, Excitonic clusters in coupled quantum dots, J. Phys. A: Math. Gen., 36, No.22, 5899-5904, (2003).
4. Bereiter-Hahn J, Blase C, Lozovik YE, et. al., Study of surface plasmons with a scanning acoustic microscope, QUANTUM ELECTRON., 33, No.5, 451-455 (2003).
5. Ключник А.В., Курганов С.Ю., Лозовик Ю.Е. Плазменная оптика наноструктур, ФТТ, том 45, выпуск 7, 1267(2003).
6. Klyuchnik AV, Kurganov SY, Lozovik YE, Plasmons at a hole in a screen, PHYS. SOLID STATE, 45, No.9, 1793-1797 (2003).
7. 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
8. Lozovik YE, Minogin AV, Popov AM, Possible nanomachines: Nanotube walls as movable elements, JETP LETT., 77, No.11, 631-635 (2003).
9. 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).
10. 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).
11. NB Narozhny, AM Fedotov, Yu.E. Lozovik, Dynamical Casimir and Lamb effects and entangled photon states, Laser Phys, 13, No2, 298-304 (2003).
  12. 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).
  13. 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).
  14. 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)
  15. 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).
  16. 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).
  17. Yu.E.Loizovik and I.V.Ovchinnikov, Many-photon coherence of Bose-condensed excitons: luminescence and related nonlinear optical phenomena, Phys.Rev.B66, 075124 (2002).
  18. N.E. Kaputkina, Yu.E.Loizovik, Two-dimensional exciton with spatially-separated carriers in coupled quantum wells in external magnetic field, Physica E12, 323-326(2002).
  19. Yu.E.Loizovik and I.V.Ovchinnikov, Stimulated multiphoton emission from exciton Bose-condensate, JETP Lett. 75, 10, 705 (2002).
  20. 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).
  21. Yu.E.Loizovik, N.B. Narozhny, A.M.Fedotov, Dynamical Lamb effect versus dynamical Casimir effect, Proc. SPIE (in print).
  22. Yu. E. Lozovik, V. A. Sharapov, Excitation of atom by image forces, Phys. Lett A 293, N3-4, 191-194(2002).
  23. 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).
  24. M.Bonitz, V. Golubichniy, A.V.Filinov, Yu.E.Loizovik, Single-electron control of Wigner crystallization, Microelectronic Engineering 63, N1-3, 141-145(2002).
  25. 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).
  26. Yu.E.Loizovik, Controlling Bose-condensation of excitons and phonon laser, Uspekhi Fiz. Nauk 171, N12, 1373-1376(2001).
  27. N.B.Narozhny, A.M.Fedotov and Yu.E.Loizovik, Dynamical Lamb effect *versus* dynamical Casimir effect, Phys. Rev. A.64, 053807 (2001).
  28. Yu.E. Loizovik, I.V. Ovchinnikov, Light backscattering from exciton Bose-condensate, Pis'ma v ZhETF 74, 318-322 (2001).
  29. A.L. Dobryakov, S.A. Kovalenko, Yu.E. Loizovik et al., Femtosecond spectroscopy of relaxation processes in metals and High-T-c superconductors, J. Exp. Theor. Phys., 92, N2, 267-276 (2001).
  30. Yu.E. Loizovik, 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).
  31. Yu.E. Loizovik, 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).
  32. Yu.E. Loizovik, I.V. Ovchinnikov I.V., Cooling of excitons by coherent phonon radiation,

- JETP Lett, 73, N10, 524-528(2001).
33. 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).
  34. 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).
  35. A.V. Filinov, M. Bonitz, Yu.E. Lozovik , Wigner crystallization in mesoscopic 2D electron systems,
  36. Phys. Rev. Lett., 86, N17, 3851-3854(2001).
  37. A.L.Dobryakov, S.A.Kovalenko, V.M.Farztdinov, S.P.Merkulova, N.P.Ernsting, Yu.E.Loizovik, Ultrafast relaxation in YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7- $\delta$</sub>  on the femtosecond scale: Luttinger or two-dimensional Fermi liquid?", Sol.St.Comms.116, 439 (2000).
  38. Yu.E.Loizovik, A.M.Popov, Orientational melting of two-shell nanoparticles: molecular dynamics study, Chem. Phys. Lett. 328, 355-362 (2000).
  39. Yu.E.Loizovik, 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).
  40. Yu.E.Loizovik, M.Willander, Excitons and magnetoexcitons in coupled quantum nanostructures: the role of a dirty environment, Appl. Phys., A 71, 379-390 (2000).
  41. Yu.E.Loizovik, N.B.Narozhny, A.M.Fedotov, Excitation of atom in nonstationary cavity, Pis'ma v ZhETF 72, 344-349 (2000).
  42. Yu.E.Loizovik, I.V. Ovchinnikov, Phonon laser and indirect exciton dispersion engineering, Pis'ma v ZhETF 72, N 8, 617 (2000).
  43. S.V.Lavrishchev, S.P.Merkulova, A.L.Leonov, A.L.Merkulov, Yu.E.Loizovik, Electronic micromirror, Physica Scripta, 61, 187-191(2000).
  44. D.B.Balagurov, A.V.Klyuchnik, Yu.E.Loizovik, Theory of scanning capacitance microscopy, Physics of Solid State, 42, N2, 371-376(2000); Transl. from: Fiz.Tverd.Tela, 42, N2, 361-366(2000).
  45. S.A.Verzakov, Yu.E.Loizovik, 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).
  46. A.L.Dobryakov, V.A.Karavinskii, S.A.Kovalenko, S.P.Merkulova, Yu.E.Loizovik, 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)).
  47. A.I.Belousov, Yu.E.Loizovik, Mesoscopic and macroscopic dipole clusters: structure and phase transitions, Eur. Phys. D 8, 251-264(2000).
  48. D.B. Balagurov, Yu.E.Loizovik, 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).
  49. L.V.Butov, A.V.Mintsev, Yu.E.Loizovik, 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).
  50. S.A. Kovalenko, A.L. Dobryakov, V.A.Karavanskii, D.V.Lisin, S.P.Merkulova, Yu.E. Loizovik, Femtosecond spectroscopy of porous silica, Physica Scripta 60, N6, 589-593(1999).
  51. A.L.Dobryakov, V.M.Farztdinov, Yu.E. Loizovik, Linear electromagnetic response of the nonlocal superconductor: explicit analytical results, Physica Scripta 60, (1999).
  52. V.M.Farztdinov, A.L.Dobryakov, S.A. Kovalenko, D.V.Lisin, S.P.Merkulova, F.Pudonin, Yu.E. Loizovik, Ultrafast phenomena in copper films, Physica Scripta 60, N6, 579-584(1999).
  53. A.L.Dobryakov, V.M.Farztdinov, Yu.E.Loizovik, G.Marowsky, Laser-induced nonequilibrium electron distribution in metals on a femtosecond time scale, Phys.Scripta,

- 60, N6, 572-579(1999).
54. S.P.Merkulova, A.L.Merkulov, S.V.Lavrishcev, Yu.E.Loikov, Cavitation processes in solids induced by laser pulses, *Physica Scripta* 60, N6, 547-549(1999).
  55. 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).
  56. 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).
  57. 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)).
  58. 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).
  59. Yu.E.Loikov, S.A.Verzakov, M.Willander, Superfluidity of indirect excitons in a quantum dot, *Phys.Lett.A* 260 400-405(1999).
  60. 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).
  61. 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).
  62. 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).
  63. Yu.E.Loikov, Klyuchnik A.V., Balagurov D.B., Local capacitance spectroscopy, *Phys.Scripta*, 59, No.4, 319-322(1999).
  64. 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).
  65. Yu.E.Loikov, A.V.Filinov, Transmission time of wave packets through tunnelling barriers, *JETP* 88 N5, 1026-1035(1999).
  66. 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, B.4(10), (1999).
  67. 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).
  68. 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).
  69. Yu.E. Loikov, O.L.Berman, M.Willander, Superfluidity of indirect biexcitons in superlattices, *Europhys.Lett.* 48 N3, 299-305(1999).
  70. 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).
  71. Yu.E.Loikov, O.L.Berman, A.M.Ruvinskii, Superfluidity of "dirty" excitons, *JETP Lett.*, 69, N8, 616-622(1999).
  72. 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).
  73. 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).
  74. Yu.E.Loikov, A.M.Ruvinsky, Transport of magnetoexcitons in single and coupled quantum wells, *Physica Scripta* 58, N1, 90-96(1998).
  75. Yu.E.Loikov, A.M.Ruvinsky, Magnetoexciton light absorption in inhomogeneous quasi-two-dimensional systems, *JETP* 87, N4, 788-795(1998).

76. Yu.E.Lozovik, O.L.Berman, The quantum crystallization of indirect excitons in coupled quantum wells, *Physica Scripta* 58, N1, 86-89(1998).
77. Yu.E.Lozovik, A.M. Popov, Theory, simulation and nanotechnological applications of adsorption on a surface with defects, *Surface Science* 414, N1-2 57-67(1998).
78. Yu.E.Lozovik, E.A.Rakoch, Energy barriers, structure and two stage melting of vortexes, *Phys. Rev. B* 57, N2, 1214-1225 (1998).
79. A.I.Belousov, Yu.E.Lozovik, Quantum orientational melting and the phase diagram of a mesoscopic system, *JETP Lett.* 68, N11, 858-863(1998).
80. A.I.Belousov, Yu.E.Lozovik, The new model system of mesoscopic Josephson junctions, *JETP Lett.* 66, N10, 649-654(1998).
81. A.I.Belousov, S.A.Verzakov, Yu.E.Lozovik, Josephson array of mesoscopic objects. Modulation of system properties through the chemical potential, *JETP* 114(2), 322-328(1998).
82. A.I.Belousov, S.A.Verzakov, Yu.E.Lozovik, Phase diagram of 2D array of mesoscopic granules, *J. Phys. C* 10, N5, 1079-1089(1998).
83. Yu.E.Lozovik, A.V.Poushnov, Magnetism and Josephson effect in the coupled quantum well electron-hole system, *Phys. Lett. A* 228, 399-407(1997).
84. Zh.S.Gevorkyan, Yu.E.Lozovik, Light backscattering in a two-dimensional random system, *Phys.Scripta* 56(2), 208-211(1997).
85. Yu.E.Lozovik, O.L.Berman, V.G.Tsvetus, Superfluidity of indirect magnetoexcitons in coupled quantum wells, *JETP Lett.* 66, N 5, 332-337(1997).
86. Yu.E.Lozovik, O.L.Berman, Metal-insulator transition in a two-layered electron-hole system, *Solid State Phys.* 39, N9, 1476-1478(1997).
87. Yu.E.Lozovik, O.L.Berman, Phase transitions in the system of spatially separated electrons and holes, *JETP* 84, N 5, 1027-1035(1997).
88. N.K.Kultanov, Yu.E.Lozovik, 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).
89. V.M.Farzdinov, A.L.Dobryakov, V.S.Letokhov, S.A.Kovalenko, Yu.E.Lozovik, Yu.A.Matveets, N.P.Ernsting, Spectral dependence of femtosecond relaxation and coherent phonons excitation in C<sub>60</sub> films, *Phys. Rev. B* 56(7), 4176-4185(1997).
90. Yu.E.Loosovik, M.V.Nikitkov, Drag effects in a two-layer system of spatially separated electrons and excitons, *JETP* 84(3), 612-618(1997).
91. Yu.E. Loosovik, O.L.Berman, Phase transitions in the system of two coupled quantum wells, *JETP Lett.* 64(8), 573 (1996).
92. Yu.E.Loosovik, Clusters in confined potentials, *Izvestiya RAN, Phys.* 60(9), 85-91(1996).
93. N.K.Kultanov, Yu.E.Loosovik, 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).
94. Ю.Е.Лозовик, Ионные и электронные кластеры, *УФН*, 153, N2, 356-358(1987).
95. Yu.E.Loosovik, 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.
96. Ю.Е.Лозовик, Кластеры в удерживающих потенциалах, *Известия РАН, Серия физическая* 60(9), 72-80(1996).
97. Ю.Е.Лозовик, А.М.Попов, Образование и рост углеродных наноструктур - фуллеренов, наночастиц, нанотрубок и конусов, *УФН* 167 (7), 751-774(1997).
98. Yu.E.Loosovik, 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).

99. 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).
100. Ю.Е.Лозовик, О.Л.Берман, Фазовые переходы в системе из двух связанных квантовых ям, *Письма в ЖЭТФ* 64(8), 526-531(1996).
101. Ю.Е.Лозовик, М.В.Никитков, Эффекты увлечения в двухслойной системе пространственно-разделенных электронов и экситонов, *ЖЭТФ* 111(3), 1107-1119(1997).
102. Ю.Е.Лозовик, А.М.Рувинский, Магнитоэкситонное поглощение в связанных квантовых ямах, *ЖЭТФ* 112(11) 1791-1808(1997).
103. 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).
104. Ю.Е.Лозовик, О.Л.Берман, Фазовые переходы в системе пространственно-разделенных электронов и дырок, *ЖЭТФ* 111 (5), 1879-1895(1997).
105. Zh.S.Gevorkyan, Yu.E.Loikov, Light backscattering in a two-dimensional random system, *Phys.Scripta* 56, N2, 208-211(1997).
106. А.И.Белоусов, Ю.Е.Лозовик, Новая модель систем мезоскопических джозефсоновских контактов, *Письма в ЖЭТФ* 66(10), 649-653(1997).
107. 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).
108. Yu.E.Loikov, E.A.Rakoch, Energy barriers, structure and two stage melting of microclusters, *Phys.Rev.B*, 57, N3, 1214-1225 (1998).
109. Yu.E.Loikov, E.A.Rakoch, Coulomb clusters: melting and potential barriers, *Phys.Lett.A* 240, 311(1998).
110. A.I.Belousov, S.A.Verzakov, Yu.E.Loikov, Phase diagram of 2D array of mesoscopic granules, *J. Phys. C* 10, 1079-1089(1998).
111. А.И.Белоусов, С.А.Верзаков, Ю.Е.Лозовик, Джозефсоновский массив мезоскопических объектов. Модуляция свойств системы химическим потенциалом, *ЖЭТФ* 114(1/8), 591-604(1998).
112. 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).
113. 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).
114. Yu.E.Loikov, A.V.Klyuchnik, D.B.Balagurov, Local capacitance spectroscopy, *Phys.Scr.*,59,319-322(1999).
115. Ю.Е.Лозовик, А.В.Филинов, Время прохождения волновых пакетов через туннельные барьеры, *ЖЭТФ*, 115, 1872-1889 (1999).



## НАУЧНО-ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ ОТДЕЛ



Отдел образован как самостоятельное подразделение в 1995 г., в него вошел аппарат ученого секретаря. Его руководителем стал ученый секретарь к.ф.-м.н. О.А.Туманов. В настоящее время в отделе работают: референт дирекции В.М.Перкова, помощник ученого секретаря А.В.Летохова, 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, сотрудницы — З.Н.Назарова, Е.А.Николаева).

Библиотека располагает фондом 58600 печ.ед., включающим в себя 12150 отечественных и иностранных книг по оптике и спектроскопии и некоторым смежным вопросам, 4500 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 российских и 33 наименований иностранных научных журналов.

Библиотека имеет выход в Internet и пять действующих баз данных — “Current Contents (PSES)”, “Труды сотрудников Института спектроскопии”, “Книги по оптике и спектроскопии”, “Fullerenes”, “Surface Science“ для оперативного пользования.

В журнале “Оптика и спектроскопия” один раз в 2 года выпускается библиография “Книги по оптике и спектроскопии” под редакцией В.Б.Белянина, которую готовит А.Н.Макарова.

При библиотеке создан Библиотечный совет в составе: Ю.Е.Лозовик - председатель, В.Г.Колошников, Е.А.Рябов, А.Н.Рябцев, О.А.Туманов и А.Н.Макарова, который регулярно обсуждает политику подписки и нужды библиотеки. На Ученом совете раз в год 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). Сеть Института построена на базе Ethernet UTP. К клиентским машинам подведены линии 10 Мбит, сервер и два коммутатора работают на скоростях 100 Мбит. Подключение к городской сети выполнено с помощью одномодового оптоволокна на скорости 100 Мбит. В настоящее время к сети подключено 150 машин. Объем дискового пространства на сервере - 200 Гбайт. В результате более 100 научных сотрудников Института имеют возможность прямого выхода в сеть "Internet" и знакомства с текущей научной информацией.

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.

В Институте ведется подготовка научных и научно-педагогических кадров по двум направлениям: аспирантура (основная форма планомерной подготовки научных кадров) и соискательство ученых степеней вне аспирантуры. Эту работу организует В.М.Перкова.

За последние 5 лет (1994-1998 г.г.) в плановой очной аспирантуре ИСАН проходили подготовку 16 аспирантов и 7 соискателей по трем специальностям: "Оптика"(01.04.05), "Теоретическая физика" (01.04.02) и "Физика конденсированного состояния" (01.04.07). 4 аспиранта и 3 соискателя ученой степени успешно защитили кандидатские диссертации. Руководство аспирантами осуществляли доктора наук (4 чел.) и кандидаты наук (4 чел.) — в основном руководители научных направлений (подразделений).

## ОПЫТНОЕ ПРОИЗВОДСТВО. ИНЖЕНЕРНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ СЛУЖБЫ ИНСТИТУТА.

Опытное производство (ОП) Института (руководитель — Г.К.Зинченко) относится к основным подразделениям из-за его важной роли в обеспечении проводимых в научных лабораториях экспериментов необходимыми оптико-механическими и электронными устройствами, приборами, системами и установками. Перечень изготавливаемой в ОП продукции включает в себя 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 трех отделений (цехов): механо-сборочного, оптического и монтажа и регулировки радиоэлектронной аппаратуры (РЭА). Общая численность работающего в ОП персонала составляет 23 человека, включая 2 ОТР.

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), газосварочное оборудование, участок для проведения слесарно-сборочных работ и ремонтный участок. Как правило, наладка и запуск сложных приборов производится в лабораториях силами научных сотрудников этих лабораторий. Общее число рабочих механо-сборочного цеха — 11 человек.



Оптический цех (рук. — Р.П.Сургутсков) включает участок изготовления и предварительной обработки заготовок (материал — стекло, кварц, кристаллы, полупроводники), участок полировки оптических деталей, участок нанесения вакуумных покрытий, измерительный участок для контроля качества изготавливаемых оптических деталей и стеклодувный участок. В цехе работают 5 рабочих. Цех монтажа и регулировки РЭА состоит из 5 радиотехников высокой квалификации и работает в теснейшем контакте с инженерами-разработчиками РЭА из Отдела лазерно-спектрального приборостроения.

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 изготавливать 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 (гл.инженер — Е.И.Юлкин) обеспечивают бесперебойную подачу электроэнергии, воды, тепла в помещения Института, телефонную связь и обслуживание инженерных коммуникаций и сантехнического оборудования. Годовое потребление электроэнергии Институт составляет примерно 1 млн. кВт-час.

В составе отдела главного инженера имеется криогенный участок, который снабжает научные лаборатории жидким азотом и жидким гелием. Годовое потребление лабораториями жидкого азота составляет примерно 25 тонн, потребление жидкого гелия около 250 кг/год.

Текущий ремонт помещений, зданий, перепланировку помещений, возведение небольших сооружений и др. строительные работы осуществляет ремонтно-строительная группа в составе 3 рабочих.

Автохозяйство Института (рук. — Р.П.Сургутсков) насчитывает 7 единиц, включая 2 легковые и 2 грузовые машины, автобус, трактор, автопогрузчик. Число работающих в гараже водителей и автослесарей — 4 человека.

Общая численность отдела главного инженера — 16 человек.

Имеются 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), ответственный за обеспечение Института необходимыми материалами.

Хозяйственный отдел (рук. — В.И.Боровский включает в себя персонал, выполняющий работы по уборке территории и помещений (22 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).



Финансовый отдел (рук. — гл.бухгалтер М.Н.Терехина, 6 человек) осуществляет функции учета и движения финансовых и материальных потоков. Почти все производимые бухгалтерские расчеты компьютеризованы.

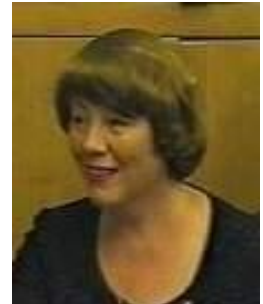
С 1992 г. в Институте введен внутренний хозрасчет, по которому руководители отделов и самостоятельных лабораторий взяли на себя ответственность как за изыскание дополнительных к бюджетному финансированию средств за счет грантов, контрактов, договоров, так и за их рациональное использование, поскольку только 20 % от этих средств отчисляется на общеинститутские нужды.

Такой хозрасчет увеличил нагрузку на финансовый отдел, но зато развязал инициативу отделов. Именно благодаря этому обстоятельству Институт смог успешно работать даже в периоды резкого уменьшения или нерегулярности поступления бюджетного финансирования.

Небольшой отдел кадров (Л.С.Васильева — рук., 2 человека) выполняет обязанности по оформлению принимаемых и увольняющихся сотрудников и учету рабочего времени, ведет учет военнообязанных и представляет дирекции необходимую информацию и аналитические отчеты по кадровым вопросам.

Общее руководство инженерными и вспомогательными службами Института осуществляет заместитель директора по общим вопросам Е.И.Юлкин.

Руководители инженерных и вспомогательных служб периодически приглашаются на совещания в дирекцию Института, на которых обсуждаются текущие хозяйственные и производственные вопросы.



### *Приложение 1.*

#### **Список докторских диссертаций, защищенных сотрудниками ИСАН в 1993-2003 гг.**

1. Бурлаков В.М. — Исследование параметра порядка фазовых переходов в сильно анизотропных сегнетоэлектриках-полупроводниках  $A^{IV}B^VC^{VII}$  и  $A^{III}B^{III}C^{VI}_2$  методами колебательной спектроскопии, 1993 г.
2. Большов М.А. — Лазерный атомно-флуоресцентный ультрачувствительный метод детектирования следов элементов, 1993 г.
3. Балыкин В.И. — Воздействие сил светового давления лазерного излучения на движение атомов и ионов, 1994 г.
4. Компанец О.Н. — Разработка и исследование спектрометров на непрерывных  $CO_2$  и He-Ne лазерах и импульсных лазерах на красителях для проведения спектроскопических метрологических и аналитических измерений, 1994 г.
5. Камчатнов А.М. — К теории некоторых нелинейных процессов в оптике и физике твердого тела, 1998 г.

### *Приложение 2.*

#### **Список монографий, опубликованных сотрудниками ИСАН в 1993-2003 гг.**

1. V.I.Balykin, V.S.Letokhov — Atom Optics with Laser Light, (Laser Science and Technology Series, Vol.18), 1995, 115 p.
2. Zhizhin G.N., Mukhartov E.I. — Optical Spectra and Lattice Dynamics of Molecular Crystals. Amsterdam: Elsevier, 1995, 447 p.
3. Dmitriev V.G., Gurzadyan G.G., Nikogosyan D.N. — Handbook of Nonlinear Optical Crystals. Berlin: Springer-Verlag, 1996, 413 p.
4. Nikogosyan D.N. — Properties of Optical and Laser-Related Materials. Chichester et. al.: Wiley, 1997, p.594.
5. Бурева Л.А., Лисица В.С. Возмущенный атом. - М.: ИздАГ, 1997. - 464 с.
6. Kuptsov A.H., Zhizhin G.N. — Handbook of fourier transform raman and infrared spectra of polymers. Amsterdam: Elsevier, 1998.
7. Bureyeva L.A., Lisitsa V.S. — A Perturbed Atoms. Harwood Academic Publ., (Astrophysics and Space Physics Reviews, Vol.11), 2000, 455 p.

8. Купцов А.Х., Жижин Г.Н. — Фурье-КР и Фурье-ИК спектры полимеров. – М.: Физматлит, 2001. - 656 с.

### **Приложение 3.**

#### **Редакционная деятельность сотрудников Института спектроскопии**

##### **АГРАНОВИЧ В.М.**

РЕДАКТОР:

1. Журнал “Physics Letters A”, 1986 - по настоящее время.
2. Журнал “Solid State Communications”, 1975-1994.
3. Серия монографий: Modern Problems in Condense Matter Science (Elsevier) ed. by V.M.Agranovich and A.Maradudin (вышло 35 томов).

ЧЛЕН РЕДКОЛЛЕГИЙ ЖУРНАЛОВ:

1. Pure and Applied Optics, 1996 - настоящее время.
2. Photonics Science News, 1995 - настоящее время.

##### **БОЛЬШОВ М.А.**

ЧЛЕН РЕДКОЛЛЕГИИ ЖУРНАЛА:

Spectrochimica Acta D, 1989 - по настоящее время.

##### **КОЛОШНИКОВ В.Г.**

ЧЛЕН РЕДКОЛЛЕГИИ ЖУРНАЛА:

Аналитическая химия, 2001 – настоящее время.

##### **ЛЕТОХОВ В.С.**

РЕДАКТОР:

1. Серия монографий: Laser Science and Technology (Harwood Academic Publ) ed. by V.S.Letokhov, C.V.Shank, Y.R.Shen, and H.Walther (вышло 20 томов).
2. Журнал “Lasers in the Life Sciences”



coeditor, 1986 - по настоящее время.

3. Журнал "Laser Chemistry"  
regional editor, 1982 - по настоящее время.

4. Журнал "Nonlinear Optics"  
coordinate regional editor, 1991 - по настоящее время.

#### ЧЛЕН РЕДКОЛЛЕГИЙ ЖУРНАЛОВ:

1. ЖЭТФ, 1980-1982.

2. Квантовая электроника, 1974 - по настоящее время.

3. Optics Communications, 1976 - по настоящее время.

4. Optics Letters, 1977, 1979-1980, 1982-1986, 1988-1990.

5. Comments Atomic and Molecular Physics, 1977 - по настоящее время.

6. Journal of Modern Optics (part "Optics Acta"), 1986 - по настоящее время.

7. Chemical Physics, 1981 - по настоящее время.

8. Chemical Physics Letters, 1991- по настоящее время.

9. Nuovo Cimento. B, 1977-1982; Nuovo Cimento. D и P, 1995.

10. Chinese Journal of Lasers, 1989-1997.

11. Applied Physics B., 1980-1992.

12. Laser Focus, 1971-1982.

## Содержание

<b>ВВЕДЕНИЕ</b>	<b>2</b>
<b>ОТДЕЛ АТОМНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ</b>	<b>6</b>
Лаборатория атомной спектроскопии	6
Лаборатория спектроскопии плазмы	11
<b>ОТДЕЛ МОЛЕКУЛЯРНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ</b>	<b>14</b>
Лаборатория молекулярной спектроскопии высокого разрешения и аналитической спектроскопии	15
Сектор электронных спектров молекул	18
Сектор микроволновой спектроскопии	31
<b>ОТДЕЛ СПЕКТРОСКОПИИ ТВЕРДОГО ТЕЛА</b>	<b>34</b>
Лаборатория спектроскопии конденсированных сред	34
Лаборатория спектроскопии полупроводниковых структур	40
Сектор Фурье-спектроскопии	45
<b>ОТДЕЛ ЛАЗЕРНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ</b>	<b>55</b>
Лаборатория лазерной спектроскопии	55
Лаборатория спектроскопии возбужденных состояний молекул	68
Лаборатория спектроскопии ультрабыстрых процессов	75
<b>ОТДЕЛ ЛАЗЕРНО-СПЕКТРАЛЬНОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ</b>	<b>89</b>
<b>ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ОТДЕЛ</b>	<b>96</b>
<b>ЛАБОРАТОРИЯ СПЕКТРОСКОПИИ НАНОСТРУКТУР</b>	<b>106</b>
<b>НАУЧНО-ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ ОТДЕЛ</b>	<b>121</b>
<b>ОПЫТНОЕ ПРОИЗВОДСТВО.</b>	<b>123</b>
<b>ИНЖЕНЕРНЫЕ СЛУЖБЫ ИНСТИТУТА</b>	
<b>Приложения</b>	<b>126</b>