

**ИНСТИТУТ СПЕКТРОСКОПИИ  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**

**25 ЛЕТ**

**Троицк  
1993**

# **ИНСТИТУТ СПЕКТРОСКОПИИ Российской академии наук**



**Троицк Московской обл.  
1993**



**Основатель и первый директор  
Института спектроскопии  
профессор**

**Мандельштам С.Л.**

## ВВЕДЕНИЕ

Фундаментальная наука, как известно, изучает глубинные свойства природы. Каждый объект природы обладает своей неповторимой энергетической структурой — спектром, который, как отпечаток пальца человека, однозначно говорит о его носителе — его составе, структуре, свойствах. Получение спектров природных объектов, исследование эффектов взаимодействия электромагнитного излучения с веществом, а также предложения по их использованию — основные задачи спектроскопии.

Изучение спектров и динамики их изменений под влиянием различных внешних воздействий на вещество (температура, давление, электрические и магнитные поля, подсветка и др.), в процессе химических реакций и превращений, а также при изменении геометрии эксперимента (размерные эффекты, дирекционная зависимость и т.д.) позволяет получать уникальную информацию о физических и химических свойствах вещества и приблизиться к решению фундаментальной проблемы «структура — свойства», особенно важной для создания новых материалов. Достаточно сказать, что основные астрофизические выводы, а также важнейшие результаты физики твердого тела и физики горячей плазмы получены на основании спектроскопических исследований.

Особенно широкие возможности для фундаментальных и прикладных целей открываются при активном воздействии мощного светового потока на вещество. Так например, с помощью лазера можно как охладить газ до сверхнизких температур (~ микроКельвин), недостижимых другими методами, так и создать сверхплотную термоядерную плазму с температурой до нескольких сотен миллионов градусов и изучать, таким образом, в лабораторных условиях физические процессы, протекающие как в пустоте космоса, так и в звездах. С помощью излучения можно ионизовать атомы, диссоциировать молекулы, модифицировать ближайшее окружение молекулы в матрице, управлять химическими реакциями, создать гигантские по величине локальные электрические и магнитные поля в веществе, управлять движением атомных пучков и т.д.

Спектроскопия — это не только фундаментальная наука, но и метод и инструмент в разнообразных конкретных науках, а также в технических и технологических приложениях. Это и новые оптические эффекты, и фотохимия, и лазер-

ное разделение изотопов, и ультрачувствительный анализ, и контроль состава и качества продукции, и разнообразные новые технологии и новые материалы, и экологический мониторинг окружающей среды. Для научно-технического прогресса особенно важны два последних аспекта: новые материалы и технологии и экологический контроль.

**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, 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.

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.

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

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

5. Подготовка научных кадров высшей квалификации.

Успехи Института, признанные в СССР и за рубежом, созданы умением и талантом его со-

трудников. 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.

Важным направлением работ Института с момента его организации является 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. Многие из создаваемых в Институте приборов и методик являются оригинальными и перспективными для применений в народном хозяйстве, обороне, медицине, экологии.

Институт ведет исследования 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.

Область изучаемых спектров различных объектов простирается от рентгеновского до сантиметрового диапазона длин волн. Для получения спектров в Институте создан большой набор спектральных приборов и установок, многие из которых являются уникальными и не имеющими аналогов в мире.

Среди них:

— 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 ( $10^{-15}$  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;

— приборы с высоким спектральным разрешением до  $10^{-6}$  см<sup>-1</sup> и временным разрешением до  $3 \times 10^{-14}$  сек.

· Подавляющее большинство исследований в Институте ведется на переднем крае мировой науки. За 25 лет существования ИСАН его сотрудниками защищено более 100 кандидатских и около 30 докторских диссертаций. Список докторских диссертаций приведен в Приложении 1, поскольку их названия отражают основные направления работ Института.

С 1969 по 1992 год сотрудниками Института опубликовано более 3100 научных статей в реферируемых журналах, из них более трети в ведущих зарубежных журналах. Издано около 30 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:

**теоретический отдел** — 16 человек, заведующий отделом профессор В.М.Агранович. В составе отдела: сектор спектроскопии фазовых переходов (5 человек, зав. сектором д.ф.-м.н. А.Г.Мальшуков) и сектор нелинейной спектроскопии (10 человек, зав. сектором д.ф.-м.н. В.И.Рупасов);

**отдел атомной спектроскопии** — 26 человек, зав. отделом д.ф.-м.н. А.Н.Рябцев. В составе отдела: лаборатория атомной спектроскопии (18 человек, зав. лабораторией д.ф.-м.н. А.Н.Рябцев) и лаборатория спектроскопии плазмы (8 человек, зав. лабораторией к.ф.-м.н. К.Н.Кошелев);

**отдел молекулярной спектроскопии** — 43 человека, заведующий отделом профессор Р.И.Персонов. В составе отдела: лаборатория электронных спектров молекул (14 человек, зав. лабораторией профессор Р.И.Персонов), лаборатория молекулярной спектроскопии высокого разрешения и аналитической спектроскопии (23 человека, зав. лабораторией к.ф.-м.н. В.Г.Колошников) и тематическая группа «колебательная спектроскопия молекул» (6 человек, рук. группы д.х.н. Я.М.Кимельфельд);

**отдел спектроскопии твердого тела** — 30 человек, зав. отделом профессор Г.Н.Жижин. В составе отдела: лаборатория спектроскопии кристаллов (11 человек, зав. лабораторией профессор Г.Н.Жижин), лаборатория колебательной спектроскопии конденсированных сред (9 человек, зав. лабораторией д.ф.-м.н. Б.Н.Маврин) и лаборатория спектроскопии поверхности (10 человек, зав. лабораторией профессор В.А.Яковлев);

**отдел лазерной спектроскопии** — 49 человек, зав. отделом профессор В.С.Летохов. В составе отдела: лаборатория лазерной спектроскопии (21 человек, зав. лабораторией профессор В.С.Летохов), лаборатория спектроскопии возбужденных состояний молекул (11 человек, зав. лабораторией д.ф.-м.н. Е.А.Рябов), лаборатория спектроскопии ультрабыстрых процессов (11 человек, зав. лабораторией к.ф.-м.н. Ю.А.Матвеец) и лазерный аналитический центр (6 человек);

**лаборатория спектроскопии полупроводниковых структур** — 12 человек, зав. лабораторией профессор Е.А.Виноградов;

**лаборатория лазерно-спектрального приборостроения** — 31 человек, зав. лабораторией к.ф.-м.н. О.Н.Компанец;

**тематическая группа математического моделирования** — 3 человека, рук. группы к.ф.-м.н. Ю.Е.Лозовик;

При Институте работает **научный совет по проблеме «Спектроскопия атомов и молекул»** — зам. председателя Совета к.ф.-м.н. Л.А.Буреева.

В настоящее время в Институте спектроскопии РАН работает 410 человек, из них научных сотрудников вместе с инженерами-физиками, студентами и аспирантами лабораторий — 255 человек, в том числе 23 доктора наук и 73 кандидата наук. В опытном производстве — 76 человек, в оптической мастерской — 11, криогенном участке — 5. Административно-управленческий аппарат — 53 человека.

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 — к.ф.-м.н. О.Н.Компанец, ученым секретарем — к.ф.-м.н. О.А.Туманов, заместителем директора по общим вопросам — Н.И.Багданскис.

Все основные вопросы научной и организационной деятельности Института решаются Ученым Советом, состоящим из ведущих научных сотрудников: Е.А.Виноградов (председатель), О.Н.Компанец (зам. председателя), О.А.Туманов (Ученый секретарь), В.М.Агранович, Г.И.Беков, М.А.Большов, Г.Н.Жижин, Л.Н.Иванов, В.Г.Колошников, К.Н.Кошелев, А.А.Качанов, В.С.Летохов, Ю.Е.Лозовик, Б.Н.Маврин, Г.Н.Макаров, А.Г.Мальшуков, Ю.А.Матвеец, Р.И.Персонов, А.А.Пурецкий, В.И.Рупасов, Е.А.Рябов, А.Н.Рябцев, Б.М.Харламов.

В Институте работает специализированный Ученый совет по присуждению ученых степеней кандидата и доктора физико-математических наук по специальностям «оптика» и «теоретическая и математическая физика» (председатель специализированного Совета — Е.А.Виноградов, ученый секретарь — У.И.Сафронова).

При Институте работает базовая кафедра квантовой оптики (зав. кафедрой профессор В.С.Летохов) Московского физико-технического института, которая обеспечивала все эти годы постоянный приток талантливой молодежи.

Имеется научно-техническая библиотека, одна из наиболее полных в России в части спектроскопической литературы.

Признанием заслуг ученых ИСАН служат высшие научные премии, присужденные за выполненные в институте исследования:

В.С.Летохову (совместно с В.П.Чеботаевым) в 1978 г. была присуждена Ленинская премия за работы по нелинейной лазерной спектроскопии.

В.Г.Колошников и Ю.А.Курицын (совместно с сотрудниками ФИАНА и др.) в 1985 г. были удостоены Государственной премии СССР за работы по диодной лазерной спектроскопии высокого разрешения.

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

А.А.Макаров, Ю.А.Горохов, А.А.Пурецкий, Е.А.Рябов, Н.П.Фурзиков в 1978 г. удостоены премии Ленинского комсомола за работы по лазерному разделению изотопов.

С.Л.Мандельштам получил в 1977 г. за работы по спектроскопии многократно ионизованных атомов премию АН СССР имени академика Д.С.Рожественского.

В.М.Агранович получил в 1992 году премию им. Александра фон Гумбольдта (Германия) и премию им. П.Капицы (Англия, 1993) за работы по физике твердого тела.

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

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ОТДЕЛ

Теоретический отдел Института спектроскопии был организован в мае 1969 года после того, как Сергей Леонидович Мандельштам пригласил на работу в ИСАН профессора В.М.Аграновича, до того возглавлявшего Теоретическую лабораторию Физико-энергетического института (г. Обнинск). Вместе с В.М.Аграновичем из Обнинска в теоротдел ИСАН перешел М.А.Мехтиев, а также вскоре и Ю.Е.Лозовик, ранее входивший в лабораторию Г.Н.Жижина. В дальнейшем в теоротдел были приглашены на работу, в основном через аспирантуру МФТИ, большинство нынешних сотрудников.

### **Эффекты сильного ангармонизма в колебательных спектрах кристаллов**

Еще в начальный период (1969 — 1971 гг.) в теоротделе было начато развитие теории бифононов и ферми-резонанса на поляритонах. Эти теоретические исследования (их обзоры см. в [1 — 3]) стимулировали развитие эксперимента в ИСАН и других лабораториях и вскоре бифононы и ферми-резонанс на поляритонах были обнаружены во многих кристаллах. В этих экспериментальных исследованиях важнейшую роль сыграли выполненные в ИСАН пионерские работы Б.Н.Маврина и Х.Е.Стерина, первыми откликнувшихся на призыв теоретиков. Эти эксперименты, а также эксперименты по KARS с временным и пространственным разрешением, проведенные в группе К.Флитцаниса (Париж), составляют наиболее убедительное подтверждение развитой в ИСАН теории эффектов сильного ангармонизма в кристаллах.

### **Экситоны, поляритоны и эффекты пространственной дисперсии в кристаллооптике**

Эта группа фундаментальных проблем спектроскопии конденсированного состояния вещества всегда занимала значительное место в работах сотрудников теоротдела. Их основные усилия были связаны с развитием теории экситонов и поляритонов, методов расчета линейных и нелинейных поляризуемостей кристаллов, анализом добавочных граничных условий, а также анализом поправок к «старым» максвелловским граничным условиям, которые возникают при учете пространственной дисперсии. Большинство из полученных при этом результатов отражено в известной монографии [4]. Дополнительно упомянем теорию поверхностных экситонов и поляритонов при учете пространственной дисперсии

[5], позволяющую сделать вывод о существенном влиянии вида добавочных граничных условий на дисперсию этих элементарных возбуждений; а также метод действующего поля, являющийся обобщением на анизотропные среды метода Лоренца [6].

Среди работ более позднего времени отметим выполненный впервые анализ роли поверхностных и волноводных поляритонов в поляритонном механизме экситонной люминесценции [7] и механизма распада экситонных решеток в антрацене [8], теорию диэлектрической проницаемости произвольно анизотропных сверхрешеток, в частности при учете пространственной дисперсии [9,10], теорию самоорганизации экситонов с переносом заряда при их высоких концентрациях, а также теорию экситонов и оптических нелинейностей в органических многослойных наноструктурах [11,12]. Особый интерес здесь представляет анализ нелинейностей границ раздела слоев (интерфейсов), вносящих существенный вклад как в линейные, так и в нелинейные свойства этих новых материалов. Интересным примером влияния интерфейсов могут служить найденные недавно элементарные возбуждения, обусловленные Ферми-резонансом молекул, расположенных по разные стороны от границы раздела слоев [13], а также, в тех же условиях, бистабильность при прохождении энергии через эту границу [14].

### **Спектроскопия поверхностей и тонких пленок**

В начале семидесятых годов в теоротделе были начаты также исследования по линейной и нелинейной спектроскопии поверхностей и тонких пленок. В течение нескольких лет был предсказан и изучен ряд новых оптических эффектов, среди которых упомянем расщепление в спектре поверхностных поляритонов при резонансе с колебаниями в переходном слое, эффект компенсации и метод нарушенной симметрии в спектрах КРС на поверхностных поляритонах. Тогда же было предложено использовать поверхностные волны для изучения спектров тончайших пленок, построена теория поверхностных поляритонов в анизотропных средах, изучены эффекты пространственной дисперсии и предсказаны добавочные поверхностные волны (обзор работ этого периода см. в [15]). В дальнейшем была развита теория дифракции света на поверхности, в частности, при учете добавочных поверхностных волн и на основе этой теории построе-

на теория аналога интерферометра Фабри-Перо на поверхности (обзор упомянутых дифракционных методов изучения поверхностей и тонких пленок см. в [16]). В дальнейшем (1980 г.) были также начаты исследования самоиндуцированной прозрачности на поверхности, а также нелинейных поверхностных волн (в р-поляризации), которые вместе с работами американских ученых (1980 г., s-поляризация) стимулировали продолжающееся и ныне бурное развитие области (см., например, [17]).

Изучение спектроскопии поверхности в теоретическом велось всегда в тесном творческом сотрудничестве с коллективом Г.Н.Жижина. Именно в этом коллективе впервые наблюдалось расщепление в спектрах поверхностных волн при резонансе с колебаниями в переходном слое (в ИК диапазоне, для электронной области спектра такие наблюдения были осуществлены во Франции и Германии), а также начато использование дифракционных методов и поверхностных волн для изучения оптических свойств поверхностей и тончайших пленок (эти работы отражены в коллективной монографии [18]).

### **Спектры адсорбатов и гигантское комбинационное рассеяние**

Еще в начале семидесятых годов в теоретическом были начаты работы по теории колебательных и электронных спектров молекул, адсорбированных на различного рода подложках. Для металлических подложек были изучены электромагнитные механизмы затухания электронных и колебательных возбуждений, а также предложен механизм, обусловленный возникновением под влиянием колебаний ядер, флуктуаций заряда на адсорбированной молекуле. В дальнейшем этот механизм оказался определяющим при построении теории формы полос ИК поглощения адсорбатов, а также был использован в теории структурных фазовых переходов в монослоях адсорбатов для интерпретации «химического» механизма усиления КРС адсорбатами на шероховатых поверхностях, а также в теории перехода в сверхпроводящее состояние металлов, содержащих примеси Андерсона с сильным электрон-фононным взаимодействием [19] (обзор упомянутых работ по спектроскопии адсорбатов см. в [20]).

### **Атомы и молекулы в сильных магнитных полях**

В теоретическом проводились также исследования свойств атомов, молекул и электронно-дырочных систем в сильных магнитных полях. Была предсказана обнаруженная впоследствии экспериментально магнитная диссоциация (и преддиссоциация) молекул и биэкситонов и перестройка их основного состояния в сильных магнитных полях. Рассмотрена индуцированная магнитным полем Ван-дер-Ваальсовская связь.

Новое направление исследований породили выполненные в теоретическом исследования свойств двумерного электронного газа в магнитном поле. Была предсказана кристаллизация двумерного электронного газа, индуцированная магнитным полем, ныне обнаруженная экспериментально. Подробно проанализирован спектр колебаний и фазовая диаграмма системы [21, 22]. Была построена теория фазовых переходов и спектров электронно-дырочных систем в сильных магнитных полях. Оказалось, что основное состояние этой системы при любой плотности является идеальным газом экситонов [23].

Обобщено уравнение Томаса-Ферми в сильных магнитных полях, рассчитан внутриатомный парамагнетизм [24].

Предсказано новое свойство атома — торoidalный (аномальный) момент, связанный со слабыми взаимодействиями, нарушающими четность [25].

### **Квантовая оптика и теория интегрируемых квантовых систем**

Проблемы квантовой оптики привлекли особый интерес сотрудников теоретического в последнее десятилетие. Была построена теория многомодового лазера [26]. Предсказаны гигантские флуктуации числа фотонов в отдельных лазерных модах и изрезанность спектра генерации. Таким образом, установлен теоретический (квантовый) предел порога чувствительности внутрирезонаторной лазерной спектроскопии, обнаружена высокая чувствительность многомодового лазера стоячей волны к положению активной среды и распределению потерь внутри резонатора.

Анализ, выполненный в теоретическом, показал, что ряд стандартных моделей квантовой оптики, используемых для описания кооперативного поведения системы двухуровневых атомов, взаимодействующих с квантованным электромагнитным полем, являются интегрируемыми и могут быть точно диагонализированы. Был развит новый метод описания динамики полностью интегрируемых — квантовых систем, в которых существуют связанные комплексы квазичастиц («струны»). В основе метода — найденное представление оператора эволюции системы, эффективно учитывающее разнообразные конфигурации струн. Таким образом удается явно проследить за временной эволюцией начального многочастичного состояния системы. Приложение метода к проблемам квантовой оптики позволило получить и исследовать точные решения модели Дике, описывающей явление сверхизлучения и стимулированного комбинационного рассеяния света [27-31].

### **Флуктуация в мезоскопических системах**

Сложившиеся к середине восьмидесятых годов

представления о характере локализации электронов в неупорядоченных проводниках были позднее существенно пересмотрены под влиянием двух обстоятельств. Одним из них явилось предсказание и наблюдение воспроизводимых флуктуаций проводимости и других кинетических параметров в образцах малых («мезоскопических») размеров. Другим — обнаруженная в теоретическом разделе внутренняя противоречивость общепринятого теоретического подхода к проблеме квантовой локализации, а именно — неустойчивость «нелинейной сигма-модели» по отношению к включению вершин с высшими пространственно-временными производными. В последующих работах была выявлена глубокая физическая связь между этими явлениями, и с помощью развитого аппарата расширенной сигма-модели найдено необычайно широкое — «логарифмически-нормальное» распределение кондактанса, времен релаксации, локальной плотности тока и других физических величин. (См. обзор [32]).

Интересный аналог мезоскопических флуктуаций был обнаружен в проблеме классической диффузии частиц в стационарном случайном поле с дальними корреляциями [33].

Ярким мезоскопическим эффектом является предсказанная недавно нелинейная генерация постоянного тока под действием микроволнового излучения в ансамбле мезоскопических металлических колец в магнитном поле [34]. Величина этого тока может на несколько порядков превышать величину так называемого «незатухающего тока» в отсутствие микроволнового излучения.

### **Эффекты слабой локализации света в нелинейной оптике неупорядоченных сред**

В конце восьмидесятых годов в теоретическом разделе было начато изучение особенностей нелинейных оптических процессов, протекающих в рассеивающих средах, которые обусловлены Андерсоновской локализацией фотонов. Были рассмотрены трехволновые процессы [35—37] (генерация второй гармоники и генерации разностной частоты), а также четырехволновые процессы, такие как обращение волнового фронта при отражении от поверхности рассеивающей среды [38—40] и процессы разрушения пика обратного рассеяния при наличии Керровской нелинейности [40]. Была развита теория нестационарных решеток интенсивности, а также теория генерации второй гармоники при отражении света от шероховатых поверхностей [41]. Было показано, в частности, что эффекты слабой локализации приводят к появлению новых пиков в угловых распределениях рассеянного излучения, что стимулировало постановку ряда экспериментов. Было показано, что изучение кинетики распада нестационарных

решеток в неупорядоченных (рассеивающих) средах может лечь в основу метода изучения скейлинговой зависимости коэффициента диффузии фотонов в таких средах [35]. (Обзор работ см. в [42]).

### **Литература**

1. V.M.Agranovich in: Spectroscopy and Excitation Dynamics of Condensed Molecular Systems. Ed. by V.M.Agranovich and R.M.Hochstrasser, North-Holland, Amsterdam, 1993, p. 83-137.
2. V.M.Agranovich and I.I.Lalov, *Ysp. Fiz.Nauk*, 146, p. 267, 1985.
3. V.M.Agranovich and O.A.Dubovsky in: Optical Properties of Mixed Crystals. Ed. by R.J.Elliott and I.P.Ipatova, North-Holland, Amsterdam, 1988, p. 297.
4. V.M.Agranovich and V.I.Ginzburg, *Crystal Optics with Spatial Dispersion and Excitons*, Springer-Verlag, Berlin, 1984.
5. V.M.Agranovich, in: Surface Excitation, Ed. by V.M.Agranovich and R.Loudon, North-Holland, Amsterdam, 1984, p. 513.
6. V.M.Agranovich, *Usp.Fiz.Nauk*, 143, p. 143, 1974.
7. V.M.Agranovich and T.A.Leskova, *ZhETF, Pisma v Red (Letters)*, 29, p. 151, 1979.
8. V.M.Agranovich and T.A.Leskova, in: Laser Optics of Condensed Matter, vol.2, Eds. E.Garmire, A.A.Maradudin and K.K.Rebane, Plenum Press, 1991, p. 145.
9. V.M.Agranovich and V.E.Kravtsov, *Solid State Commun.*, 55, p. 85, 1985.
10. V.M.Agranovich, *Solid State Commun.*, 78, p. 747, 1991.
11. B.P.Antonyuk and B.E.Stern, *Solid State Commun.*, 61, p. 675, 1987.
12. V.M.Agranovich, *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, accepted.
13. V.M.Agranovich, *Physica scripta*, v. 48, 1993 in press.
14. V.M.Agranovich and O.A.Dubovsky, *Chem.Phys.Lett.*, 1993, in press.
15. V.M.Agranovich, *Usp.Fiz.Nauk*, 115, p. 199, 1976.
16. V.M.Agranovich and T.A.Leskova, *Progress in Surface Science*, 29, p. 169, 1988.
17. *Nonlinear Surface Phenomena*. Eds. by H.-E.Ponath and G.I.Stegeman, North-Holland.
18. *Surface Polaritons. Electromagnetic Waves at Surfaces and Interfaces*. Ed. V.M.Agranovich and D.L.Mills, North-Holland, Amsterdam, 1982.
19. A.G.Mal'shukov, A.A.Atensio, *JETP*, 74, 539, 1992.
20. A.G.Mal'shukov, *Surface enhanced Raman scattering. Physical and Chemical aspects. — The Chemical Physics of Solvation, Part C*, 1988.
21. Yu.E.Lofovik, *Phys.Lett.*, 66A, p. 282, 1987.
22. Yu.E.Lofovik, *ZhETF, Pisma v Red (Letters)*, 22, p. 26, 1975.
23. Yu.E.Lofovik, I.V.Lerner, *ZhETF*, 80, p. 1488, 1981.
24. Yu.E.Lofovik, *Phys.Lett.*, A40, p. 281, 1972.
25. Yu.E.Lofovik, *J.Phys.* B15, 1982.
26. B.P.Mironenko and V.I.Yudson, *Opt.Comm.*, 41, p. 126, 1982.
27. V.I.Rupasov, *ZhETF*, 56, p. 989, 1982.
28. V.I.Rupasov, V.I.Yudson, *ZhETF*, 59, p. 478, 1984.
29. V.I.Rupasov, V.I.Yudson, *ZhETF*, 60, 927, 1984.
30. V.Ya.Chernyak, V.I.Rupasov, *Phys. Lett.*, 114A, 77, 1986.
31. V.I.Rupasov, *ZhETF*, 67, 2003, 1988.
32. B.L.Al'tshuler, V.E.Kravtsov and I.V.Lerner, in: *Mesoscopic Phenomena in Solids*. Eds. by B.L.Al'tshuler, P.A.Lee and R.A.Webb, North-Holland, Amsterdam, 1991, p. 449.
33. V.E.Kravtsov, I.V.Lerner, V.I.Yudson, *ZhETF*, 91, p. 569, 1986 *Phys.Lett.* 119A, p. 203, 1986.
34. V.E.Kravtsov and V.I.Yudson, *Phys.Rev.Lett.*, 70, p. 210, 1993.
35. V.M.Agranovich, V.Ya.Chernyak, K.I.Grigorishin, E.I.Ogievetsky, *Phys.Lett.A*, 165, 289, 1992.
36. V.M.Agranovich, V.E.Kravtsov, I.V.Lerner, *Phys.Lett.A*, 125, 435, 1987.
37. V.M.Agranovich, V.E.Kravtsov, *Phys.Lett.A*, 131, 378,387 1988.
38. V.M.Agranovich, V.E.Kravtsov, V.I.Yudson, *Phys.Rev.B*, 41, 2794, 1990.
39. V.M.Agranovich, V.E.Kravtsov, K.I.Grigorishin, *Phys.Rev.B*, 44, 4931, 1991.
40. V.M.Agranovich, V.E.Kravtsov, *Phys.Rev.B*, 43, 13691, 1991.
41. T.A.Leskova, McGuirn A., V.M.Agranovich, *Phys.Rev.B*, 44, 11441, 1992.
42. V.M.Agranovich, K.I.Grigorishin, *Nonlinear Optics*, 1993, in press

# 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. После реорганизации в 1989 г. отдел был представлен двумя лабораториями: — атомной спектроскопии (зав. лабораторией д.ф.-м.н. А.Н.Рябцев) и спектроскопии плазмы (зав. лабораторией к.ф.-м.н. К.Н.Кошелев), а также сектором электронно-ядерной спектроскопии (зав. сектором д.ф.-м.н. Л.Н.Иванов). Позднее из-за отсутствия финансирования экспериментальные работы по электронно-ядерной спектроскопии были прекращены,

а одноименный сектор расформирован.

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 работают 24 сотрудника, из них 4 доктора и 11 кандидатов наук.

## Лаборатория атомной спектроскопии

Основы систематики спектров ионов легких элементов были заложены исследованиями шведского ученого Б.Эдлена в 30-х - 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°) 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 обла-

сти 250 + 0,1 нм, от ультрафиолетовой до рентгеновской области спектра.

Построен неодимовый лазер мощности 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). В настоящее время лазер модернизирован с увеличением мощности до 10 ГВт (20 Дж, 2 нс) (С.С.Чурилов). Создана оригинальная конструкция малоиндуктивной вакуумной искры, имеющей в горячей области температуру в десятки миллионов градусов, превышающую температуру солнечных вспышек (Ю.В.Сидельников, Е.В.Аглицкий).

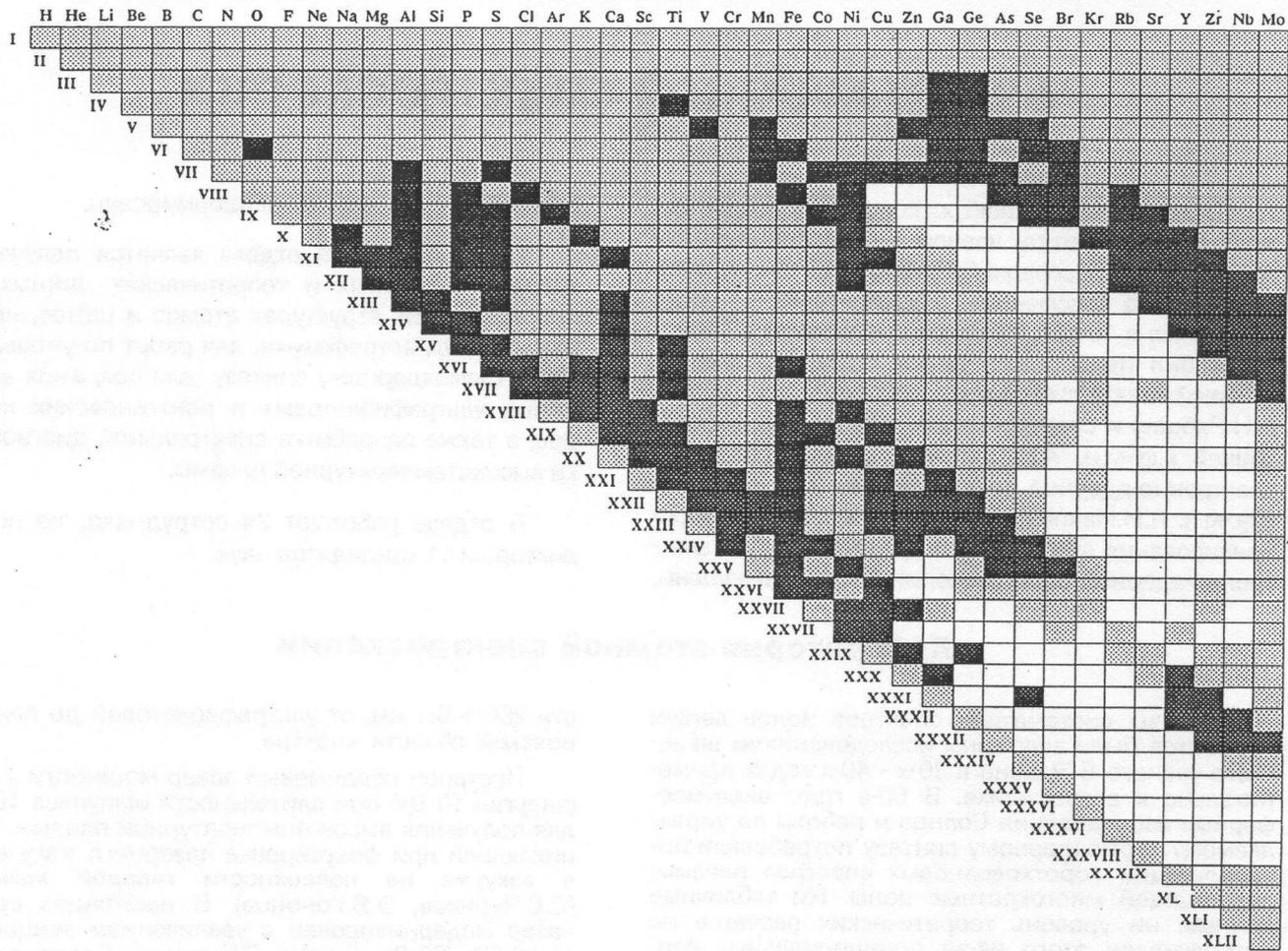
Разработан и построен полуавтоматический компаратор-микрофотометр, позволивший в значительной степени автоматизировать процесс измерения спектральных линий на фотоспектрограммах, повысить точность измерений и перевести обработку измерений на ЭВМ (В.И.Ковалев, Э.Я.Кононов). В 1991 г. введена в строй система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

Результаты систематических исследований ионных спектров в общем виде очерчены в таблице. Таблица иллюстрирует состояние изученности спектров атомов и ионов по состоянию на середину 1993 г. Каждая клеточка соответствует определенному иону; если спектр иона в той или иной мере исследовался — клеточка серая. Темными клеточками показаны ионы, в изучение которых внесли вклад работы данной лаборатории.

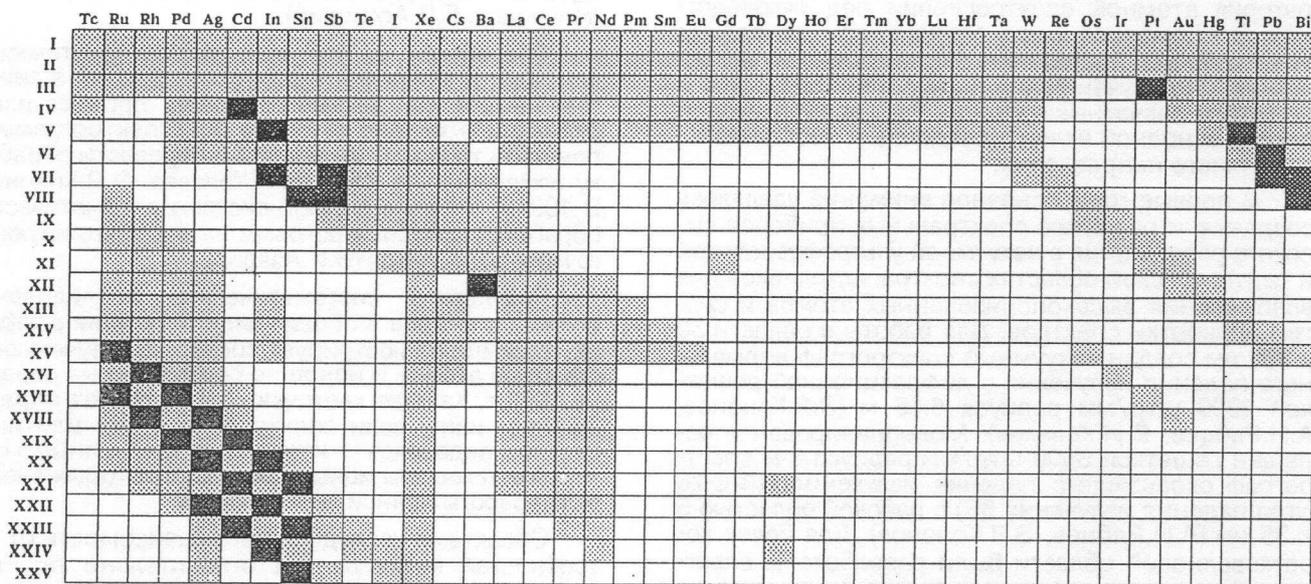
Объектами исследования в зависимости от потребностей являлись как относительно простые спектры, состоящие из десятка линий, так и весьма сложные спектры, содержащие тысячи спектральных линий.

В рентгеновской области спектра с помощью лазерной плазмы изучены ионы, в которых осталось несколько электронов: резонансные серии в водородо- и гелиеподобных ионах легких элементов

### Таблица изученности спектров ионов периодической системы (H – Mo)



### Таблица изученности спектров ионов периодической системы (Tc – Bi)



(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 Mo XLI, неонородобных - Pr L (С.Л.Мандельштам, Е.В.Аглицкий, П.С.Анциферов, А.М.Панин). 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 заполняющую оболочку  $n = 2$  (Э.Я.Кононов, А.Н.Рябцев и др.). В регистрациях 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).

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). 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).

Всего за 25 лет экспериментально изучены спектры около 200 ионов, идентифицировано более 10000 спектральных линий и найдено свыше 5000 новых уровней энергии.

Создан банк библиографии по атомным спектрам и проводится работа по созданию банка атомных данных (А.Е.Крамиды).

Одновременно развивались методы теоретических расчетов спектров. При отождествлении переходов в водородо- и гелиеподобных ионах, спутанных 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 виде разложения по 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.

Развит новый метод расчета тяжелых многоэлектронных систем, основанный на модельном

нулевом приближении (Л.Н.Иванов, Е.П.Иванова). Формально точный метод, сформулированный в рамках последовательно релятивистской теории, учитывает эффекты размера и формы ядра, а также радиационные поправки низших порядков электро-динамической теории возмущений. Экономная вычислительная процедура метода модельного потенциала расширила круг задач теоретического исследования - от многозарядных многоэлектронных ионов до атомов редкоземельных элементов. Впервые дана классификация узких и аномально узких резонансов редкоземельных ионов, предсказано наличие богатого спектра метастабильных состояний отрицательных ионов тяжелых атомов, найден новый канал быстрого распада ридберговских состояний - «монопольный реориентационный распад». Точность расчетов в некоторых случаях сравнима с экспериментальной.

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

Из таблицы видно, что экспериментальное изучение спектров начало сдвигаться 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 и физики рентгеновских лазеров. Акцент в ближайшем будущем будет перенесен на подробный анализ спектров ионов первой и второй стадии ионизации тяжелых элементов, необходимых для интерпретации спектров химически пекулярных звезд, получаемых с помощью Hubble Space Telescope. Надежда на успешное и быстрое решение этой задачи основана на использовании развиваемого в лаборатории метода автоматической идентификации сложных спектров (В.И.Азаров). Планируется также продолжить поиск автоионизационных состояний и осуществить дальнейшее продвижение вдоль изоэлектронной последовательности никеля.

Метод разложения взаимодействий по Z дает достаточно хорошие теоретические результаты для ионов с зарядом ядра  $Z < 50$ . Для расчетов более тяжелых ионов необходим более корректный учет релятивистских и квантовоэлектродинамических эффектов. Метод расчета, основанный на релятивистском базисе и разложении атомных параметров по  $aZ$ , успешно опробован в приложении к вычислениям энергий в тяжелых двухэлектронных системах (У.И.Сафронова). Планируется развить этот метод для расчетов энергий, потенциалов ионизации, вероятностей переходов и других атомных констант для трех-десяти-электронных систем для получения надежных данных для ионов вплоть до урана.

Продолжается развитие расчетов методом модельного потенциала. Основанный на последовательном квантовоэлектродинамическом подходе, данный метод позволяет единообразно изучать большой комплекс физических задач для атомов и ионов, включая взаимодействие атома с внешними полями, столкновения с электронами и кооперативные электрон-ядерные процессы.

## Лаборатория спектроскопии плазмы

Основное направление работ лаборатории — рентгеновская спектроскопия высокотемпературной плазмы, образующейся в высокочастотных импульсных разрядах.

В течение последних 15 лет сотрудниками лаборатории и Отдела атомной спектроскопии были проведены теоретические и экспериментальные исследования физики образования так называемых «горячих точек» (ГТ) — высокотемпературных, сверхплотных и интенсивно излучающих в рентгене плазменных образований в столбе разрядов с аксиальной симметрией. Первые эксперименты были проведены на установке типа «Малоиндуктивная вакуумная искра» (МВИ), созданной Ю.В.Сидельниковым и Э.Я.Гольцем по инициативе профессора С.Л.Мандельштама и руководившего в то время лабораторией атомной спектроскопии Э.Я.Кононова.

Экспериментальные методы регистрации рентгеновских спектров многозарядных ионов с рекордным по тем временам разрешением позволили провести исследования параметров плазмы ГТ (К.Н.Кошелев, Ю.В.Сидельников, П.С.Анциферов, А.Е.Крамиды и др.) и установить, что ГТ являются плазменными образованиями с уникальными свойствами: десятки миллионов градусов и временем жизни в субнаносекундном диапазоне.

Эти исследования коренным образом изменили представления о свойствах плазмы ГТ и привели к созданию модели «радиационного сжатия» для плазмы тяжелых ионов в аксиальных разрядах (К.Н.Кошелев совместно с В.В.Вихревым и В.В.Ивановым — Институт Атомной Энергии им. И.В.Курчатова), описывающий образование ГТ как результат развития  $m=0$  неустойчивостей в случае сильных радиационных потерь за счет линейчатого излучения ионов [1].

В дальнейшем оказалось, что «радиационное сжатие» — явление общее для целого ряда сильноточных разрядов с аксиальной симметрией. Для изучения этого явления при больших токах (свыше 1 МА) в 1988 году была построена мощная установка типа Z-пинч с импульсным напуском газа «МП-100» с максимальным рабочим током до 2 МА (Ю.В.Сидельников, А.Г.Крамиды, П.С.Анциферов совместно с А.А.Палкиным — ИАЭ). На этой установке был получен ряд важных результатов по динамике сжатия пинчей и развития микропинчей — ГТ (Л.А.Дорохин, Ю.В.Сопкин), в частности зарегистрировано излучение Ne-подобного иона Хе — по видимому, иона с максимальным потенциалом ионизации, зарегистрированным в лабораторной плазме.

В пионерских экспериментах, проведенных совместно с Сухумским Физико-Техническим Институтом был осуществлен режим «радиационного сжатия» с образованием микропинчей на установках типа «плазменный фокус».

Работы по «радиационному сжатию» были продолжены совместно с Университетом Дюссельдорфа на уникальном быстром «плазменном фокусе» SPEED 2 и плазмофокусных установках Университета Штутгарта. Эти работы легли в основу экспериментов по созданию импульсных источников рентгеновского и нейтронного излучения на основе разрядов типа «плазменный фокус» в целом ряде лабораторий мира [2].

В лаборатории развивался комплекс методов спектроскопической диагностики высокотемпературной плазмы для случаев сильной нестационарности и высокой оптической плотности. Совместно с Институтом экспериментальной физики Рурского Университета создана программа «TRACE» — для расчета траекторий фотонов в плотной движущейся плазме методом Монте-Карло. Созданы программы анализа

спектров многозарядных ионов.

Один из новых проектов осуществляемых в лаборатории — создание источника спектров многозарядных ионов типа ЕВІТ (П.С.Анциферов, В.Г.Мовшев). Электронно-лучевой метод получения многозарядных ионов, впервые предложенный и реализованный Е.Д.Донцом в ОИЯИ, является сейчас одним из наиболее перспективных инструментов для исследований в области атомной физики. Основные области его применения:

- инжекция тяжелых ионов в ускорителе
- атомные столкновения
- взаимодействия многозарядных ионов с поверхностью
- прецизионная спектроскопия

Созданием устройств такого типа заняты сейчас исследовательские группы в Беркли, Сандия, Канзасе, Итаке, Стокгольме, Франкфурте, Орсе, Оксфорде и других местах.

Идея метода — создание электростатической ионной ловушки с помощью объемного заряда электронного пучка и глубокая ионизация захваченных ионов тем же электронным пучком. Низкие значения плотности ионов ( $10^{12} - 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ) и температуры (10 — 100 эв) обуславливают практически естественную ширину спектральных линий многозарядных ионов в рентгеновском диапазоне  $\lambda < 10 \text{ \AA}$ , излучаемых захваченными ионами.

Цель эксперимента — прецизионные измерения сложных линейчатых спектров многозарядных ионов в рентгеновском диапазоне. Планируемые параметры ( $j\tau = 10^{20} - 10^{21} / \text{см}^2$ ,  $E = 10 \text{ кэВ}$ ) позволят получить излучение 2 — 3 переходов в изоэлектронных последовательностях L — ионов вплоть до  $Z_{\text{я}} = 40$  ( $\lambda = 3 - 6 \text{ \AA}$ ).

Несмотря на то, что параметры установки в ИСАН умеренны по сравнению с уже достигнутыми в мире (например, в Беркли  $j\tau = 10^{22} / \text{см}^2$ ,  $E = 30 \text{ кэВ}$ ), с ее помощью могут быть решены ряд интересных и актуальных задач рентгеновской спектроскопии, реализован значительный опыт ИСАН в этой области.

В свое время в ИСАНе (А.Н.Жерихин, К.Н.Кошелев и В.С.Летохов) была впервые предложена схема получения усиления в далеком ВУФ на переходах в Ne-подобных ионах [3], реализованная через несколько лет в Ливерморской Национальной Лаборатории и наиболее широко используемая в настоящее время для получения усиления в коротковолновой области. В ИСАНе была также впервые продемонстрирована возможность получения инверсии на переходах в Li-подобных ионах в рекомбинационном режиме (Э.Я.Кононов, К.Н.Кошелев, С.С.Чурилов). В настоящее время в лаборатории ведутся исследования по изучению возможности создания инверсии на переходах многозарядных ионов в результате перезарядки ионов плазменных пучков, вылетающих из пинчей, на атомах и ионах газовой-плазменной мишеней.

### Литература

- (1). Vkhrev V.V., Ivanov V.V., Koshelev K.N. Formation and evolution of the micropinch in a vacuum spark. — Sov.J.Plasma Phys., 1982, v.8, No.6, p.688.
- (2). Koshelev K.N., Pereira N.R. Micropinches in low inductive vacuum sparks and radiative collapse. — J.Appl.Phys., 1991, v.69, No.10, p.R21-44.
- (3). Zherikhin A.N., Koshelev K.N., Letokhov V.S. Gain in the far vacuum ultraviolet region due to transitions in multiply charged ions. — Sov.J.Quant.Electron., 1976, v.6, No.1, p.83-85.

# ОТДЕЛ МОЛЕКУЛЯРНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

Отдел молекулярной спектроскопии был создан в 1986г. под руководством проф.Персонова и в его состав вошли три лаборатории: Лаборатория электронных спектров молекул; 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 д.ф.-м.н.М.Р.Алиев). Последняя лаборатория в 1988г. (после преждевременной смерти М.Р.Алиева) была расформирована и ее сотрудники были переведены в различные научные подразделения

Отдела. В настоящее время Отдел состоит из 2-х лабораторий и одной тематической группы и насчитывает 43 сотрудника. Он располагает разнообразными современными экспериментальными установками и в нем ведутся широкие экспериментальные и теоретические исследования по спектроскопии высокого разрешения молекул и твердых тел. Значительное внимание в Отделе уделяется также практическим применениям результатов фундаментальных исследований для спектрального анализа и спектрального приборостроения.

## Лаборатория электронных спектров молекул

Лаборатория электронных спектров молекул была создана в Институте спектроскопии вскоре после его основания в 1969г. (сначала в виде Сектора электронных спектров, который позднее был преобразован в лабораторию). С момента основания и по настоящее время лабораторию возглавляет проф.Р.И.Персонов. Первыми сотрудниками лаборатории кроме него были к.ф.-м.н.Е.И.Альшиц и Л.А.Быковская. В настоящее время в лаборатории работает 14 человек (из них 7 кандидатов наук).

Основная область проводимых в лаборатории исследований - спектроскопия многоатомных молекул в конденсированных средах с широким использованием низких температур и лазерной техники. В лаборатории развит и применяется ряд новых методов спектроскопии высокого разрешения многоатомных молекул в твердых матрицах. Эти методы позволяют получать богатую информацию не только о примесных молекулах, но и о свойствах самой матрицы. В такого рода исследованиях проблемы молекулярной спектроскопии тесно переплетаются с проблемами спектроскопии твердого тела.

В последние 5 лет в лаборатории (наряду с исследованиями спектров конденсированного состояния) начаты также исследования спектров люминесценции и возбуждения многоатомных молекул в газовой фазе в охлажденных сверхзвуковых пучках (к.ф.-м.н.А.М.Пындык, к.ф.-м.н. Т.В.Плахотник).

Значительное внимание в лаборатории уделяется практическим проблемам спектроскопического анализа сложных органических продуктов, развитию новых селективных и высокочувствительных методов люминесцентного спектрального анализа и спектральному приборостроению.

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

### Спектроскопия сложных молекул в кристаллических матрицах

В первые годы существования в лаборатории был проведен цикл исследований квазили-

нейчатых спектров люминесценции и поглощения ряда органических молекул в замороженных кристаллических *n*-парафиновых матрицах Шпольского при 4,2 К (Е.И.Альшиц, Л.А.Быковская, Р.И.Персонов). Были изучены спектры ряда полициклических ароматических углеводородов и порфиринов, изучена «мультиплетная» структура спектров, проведены первые поляризационные измерения на тонких монокристаллах *n*-парафинов с примесями. На основе изучения ширины и формы бесфононных линий (БФЛ) и фононных крыльев (ФК) и их температурных зависимостей были установлены основные особенности электрон-фононного взаимодействия в этих системах. Были экспериментально проверены и подтверждены основные положения теории бесфононных линий (оптического аналога эффекта Мёссбауэра).

### Селективная спектроскопия сложных молекул в твердых растворах

Одним из важных достижений лаборатории является разработка методов «селективной спектроскопии» молекул в твердых матрицах, позволяющих увеличить реальное спектральное разрешение в  $10^3$ — $10^5$  раз. В экспериментах по исследованию природы широких спектральных полос твердых растворов (особенно аморфных - органических стекол и полимеров) в 1972-73гг. было показано [1,2], что при достаточно низких температурах уширение спектров неоднородно. В наблюдаемых широких полосах скрыто большое число узких БФЛ, которые могут быть выявлены с помощью селективных методов. В спектрах флуоресценции неоднородное уширение может быть устранено и тонкая структура спектра выявлена с помощью селективного лазерного возбуждения (Fluorescence Line Narrowing [1,2]) (рис.1а). Аналогично, узкие БФЛ могут быть выявлены и в спектрах фосфоресценции [3] при селективном лазерном возбуждении в области запрещенного  $T_1 \leftarrow S_0$  перехода (рис.1б).

Для выявления тонкой структуры в спектрах поглощения в селективной спектроскопии развит иной метод. Уже в первых экспериментах в 1972 г. в лаборатории было обнаружено, что при

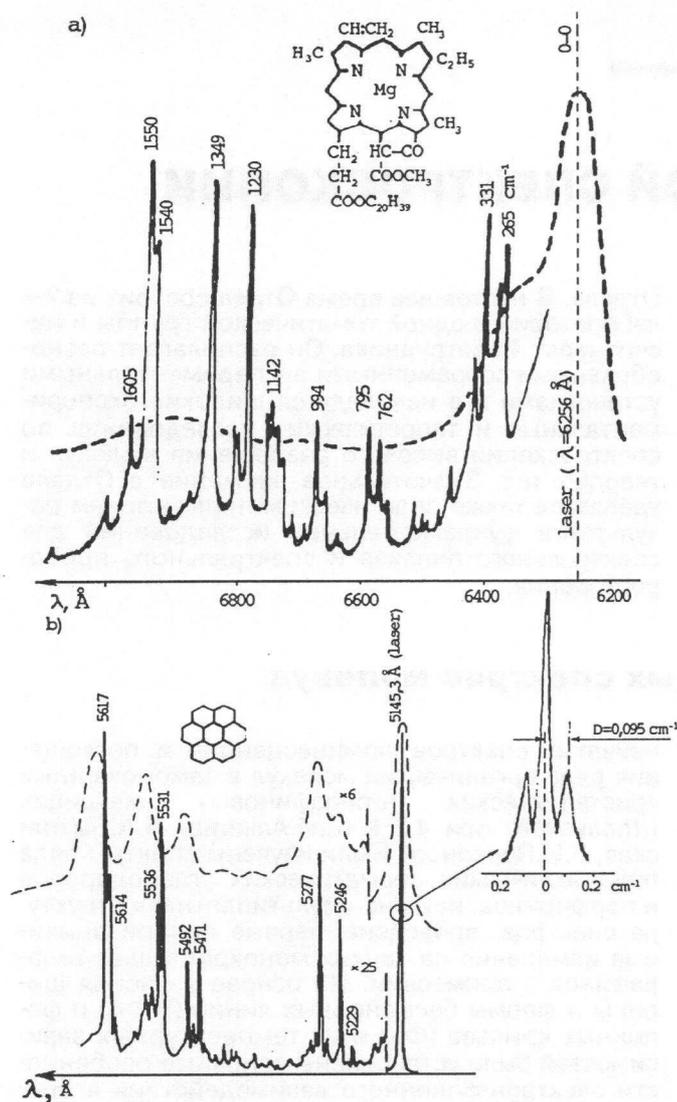


Рис. 1

Возникновение тонкой структуры в спектрах люминесценции растворов органических соединений при селективном лазерном возбуждении ( $T=4,2$  K): а) спектр флуоресценции протохлорофилла в эфире; б) спектр фосфоресценции коронена в бромистом бутиле при  $T_1=S_0$  лазерном возбуждении ( $\lambda_{\text{лаз}} = 514,5$  нм). Справа вверху показана линия 0-0 коронена при высоком спектральном разрешении. Отчетливо видно 0-полевое расщепление ( $D=0,095$  см $^{-1}$ ).

селективном лазерном облучении примесные центры могут испытывать разнообразные фотохимические и фотофизические превращения, приводящие к смещениям спектров фототрансформированных молекул. На этих фотопревращениях основан открытый в 1974г. в лаборатории, а также независимо и одновременно в Институте физики Эстонии, и разработанный впоследствии метод выжигания узких стабильных спектральных провалов в полосах поглощения (Persistent Hole Burning - PHB [4]). В результате лазерного облучения провалы возникают на всех частотах вибронных переходов «выжженных» молекул (рис.2). Совокупность всех этих провалов представляет собой тонкоструктурный спектр поглощения «выжженных» молекул, несущий богатую информацию о структуре и свойствах их возбужденных уровней.

Методы селективной спектроскопии открыли принципиально новые возможности для тонких спектроскопических исследований молекул и твердых тел и, в частности, разнообразных внутри- и межмолеку-

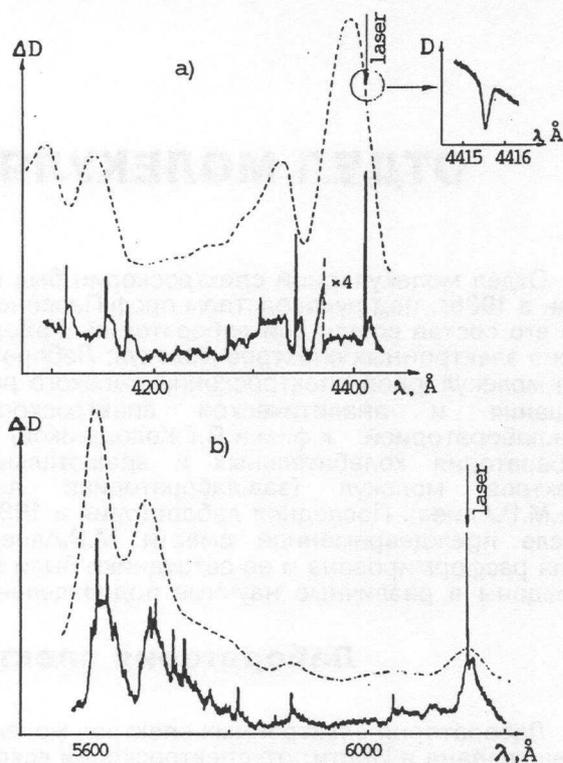


Рис. 2

Выжигание узких стабильных провалов в спектрах поглощения ( $T=4,2$  K). Пунктиром показаны спектры поглощения, сплошные кривые — спектры выжигания (разность оптических плотностей исходного спектра и спектра после выжигания). Узкие линии соответствуют частотам вибронных переходов выжженных центров. а) периллен в этаноле ( $t_{\text{выж}}=5$  мин.  $P=5$  мВт/см $^2$ ). Справа вверху — провал, выжженный на частоте лазера. б) Порфирин в полистироле ( $t_{\text{выж}}=1$  мин.  $P=5$  мВт/см $^2$ ).

лярных взаимодействий и релаксационных процессов. Многие из этих возможностей были впервые продемонстрированы в работах лаборатории, в частности, при исследовании влияния на спектры молекул внешних магнитных [5,6] и электрических [7] полей, при исследовании биологически активных молекул (например, хлорофилла и его аналогов [8]), при изучении процессов переноса и преобразования энергии в сложных молекулярных системах (к.ф.-м.н.С.Г.Куликов, к.ф.-м.н.Ю.В.Романовский, к.ф.-м.н. Н.А.Ефремов) [9], при разработке высокоселективных методов спектроскопического анализа [10] и др.

В лаборатории создана уникальная установка для оптических исследований в сильных импульсных магнитных полях (до  $5 \times 10^5$  Гаусс) при гелиевых температурах (к.ф.-м.н.Б.М.Харламов, Н.И.Улицкий). На этой установке были проведены, например, тонкие эксперименты по исследованию магнитных свойств синглетных состояний молекул ряда порфиринов в аморфных матрицах [11].

### Спектроскопия неупорядоченных молекулярных систем

Одной из важных областей применения развитых в лаборатории селективных методов является спектроскопия аморфных молекулярных систем. С помощью этих методов установлены глубокие отличия динамики органических стекол от динамики кристаллов. На основе экспериментальных исследований процессов уширения спектральных линий с помощью метода выжигания провалов в разных лабораториях мира были

предложены принципиально новые теоретические модели процессов дефазировки электронных состояний примесных центров в стеклах. Обнаружен и детально исследуется в настоящее время специфичный для низкотемпературных стекол эффект спектральной диффузии.

Широкие исследования аморфных систем в Лаборатории электронных спектров ведутся с использованием большого набора экспериментальных методов. В их числе, кроме охарактеризованного выше метода выжигания провалов, различные разновидности метода фотонного эха (к.ф.-м.н.Ю.Г.Вайнер, Н.В.Груздев) [12]. Комплексные исследования с использованием методов выжигания провалов и фотонного эха дают достоверную и уникальную информацию о динамике стекол при низких температурах.

Дальнейшие исследования в области спектроскопии неупорядоченных сред направлены (см. например, обзоры [13, 14]) на детальное исследование специфических особенностей конкретных объектов и накопление экспериментальной информации для создания микроскопической модели аморфных сред. В частности, исследуются такие параметры, как распределение локальных полей, скоростей релаксаций низкочастотных возбуждений, скоростей оптической дефазировки примесей и т.д.

### Практические применения

Результаты фундаментальных исследований имеют интересные перспективы приложений в различных областях. В частности, одно из применений селективной спектроскопии - использование метода лазерного сужения спектров флуоресценции в спектральном анализе - разрабатывается в лаборатории. Использование этого метода позволяет резко упростить, (а в ряде случаев - исключить) процесс пробоподготовки, что резко ускоряет и удешевляет анализ. В качестве примера на рис.3 приведен пример анализа автомобильного бензина на содержание малых примесей полициклических углеводородов. В данном случае анализ возможен непосредственно в сыром продукте (без какой-либо предварительной обработки образцов). Кроме того, этот метод обеспечивает наряду с высокой чувствительностью, высокую селективность анализа. В настоящее время в лаборатории ведутся как разработка новых аналитических методик (Е.И.Альшиц, Б.М.Харламов), так и разработка эффективных приборов, адаптированных к этим методикам (А.М.Пындык, В.Н.Крашенинников, Н.И.Улицкий).

В ряде работ лаборатории проводятся поиски и исследования органических материалов (различные полимеры, активированные молекулами красителей и порфиринов, сверхтонкие пленки Ленгмюра-Блоджетт и др.) перспективных для молекулярной электроники. В частности, ведутся поиски материалов для систем оптической памяти с высокой плотностью записи информации, оптических процессоров и др.

Лаборатория поддерживает тесные научные контакты со многими научными центрами мира. В настоящее время имеются совместные научные публикации сотрудников лаборатории с учеными Байройтского университета (Германия), университетов Бордо, Гренобля и Парижа (Франция), Высшей Нормальной школы в г.Кашане (Франция), Швейцарской Высшей Политехнической Школы в Цюрихе и др.

### Литература

1. а) Р.И.Персонов, Е.И.Альшиц, Л.А.Быковская. Возникновение тонкой структуры в спектрах флуоресценции слож-

ных молекул при лазерном возбуждении. Письма в ЖЭТФ, 15, 609 (1972).

- б) R.I.Personov, E.I.Al'shits and L.A.Bykovskaya The effect of fine structure appearance in laser-excited fluorescence spectra of organic compounds in solid solutions, Optics Commun., 6, 169 (1972).
2. Р.И.Персонов, Е.И.Альшиц, Л.А.Быковская, Б.М.Харламов Тонкая структура спектров люминесценции органических молекул при лазерном возбуждении и природа широких спектральных полос твердых растворов, ЖЭТФ, 65, 1825 (1973).
3. а) Е.И.Альшиц, Р.И.Персонов, Б.М.Харламов Линейчатая структура спектров фосфоресценции органических молекул в твердых растворах при лазерном  $T_1 \leftarrow S_0$  возбуждении. Оптика и спектроскопия, 41, 803 (1976); б) Е.И.Альшиц, Р.И.Персонов, Б.М.Харламов The appearance of fine structure in the phosphorescence spectra of organic molecules in solid solutions under  $T_1 \leftarrow S_0$  laser excitation. Chem.Phys.Letters, 40, 116 (1976).
4. В.М.Харламов, Р.И.Персонов, Л.А.Быковская Stable «gap» in absorption spectra of solid solutions of organic molecules by laser irradiation. Optics Commun., 12, 191 (1974).
5. В.М.Харламов, Е.И.Альшиц, Р.И.Персонов, В.И.Низхановский, V.G.Nazin Zeeman effect in complex molecules with inhomogeneously broadened phosphorescence spectra at laser  $T_1 \leftarrow S_0$  excitation. Optics Communications, 24, 199 (1978).
6. Б.М.Харламов, Е.И.Альшиц, Р.И.Персонов Эффект Зеемана в спектрах фосфоресценции сложных молекул в неупорядоченных средах при селективном возбуждении. ЖЭТФ, 87, 750 (1984).

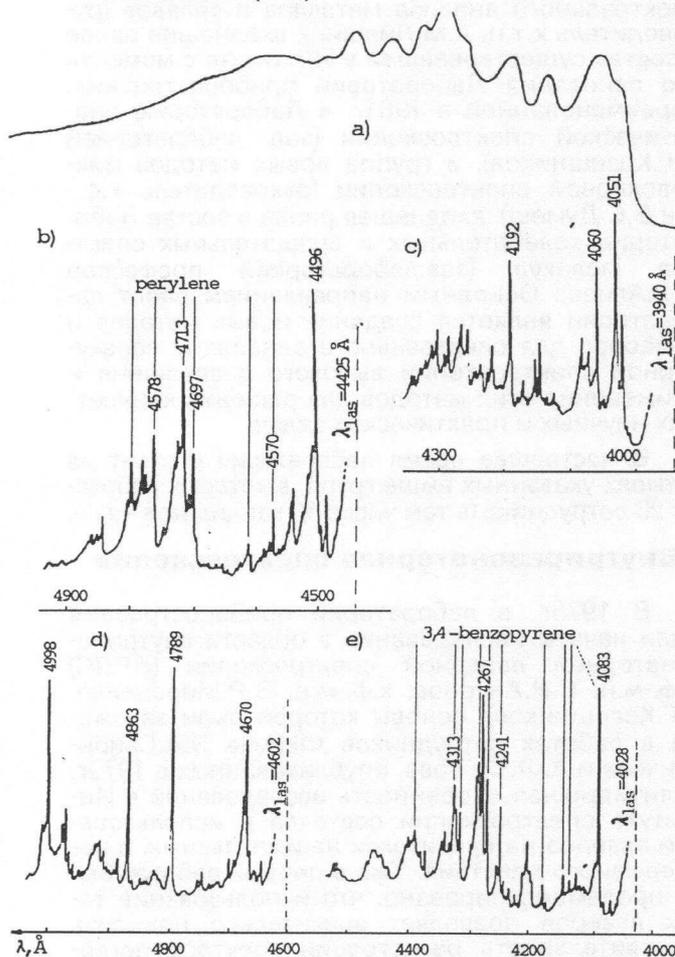


Рис. 3

Пример применения метода селективного лазерного возбуждения для люминесцентного спектрохимического анализа сложного органического продукта (бензин АИ-93 без предварительной пробоподготовки ( $T=4,2$  К)). а) часть спектра флуоресценции бензина при обычном УФ-возбуждении; б), с), d) и е) — участки спектров того же образца при селективном лазерном возбуждении. Видно, что в последнем случае по линейчатым спектрам можно надежно идентифицировать индивидуальные ароматические соединения в сложной смеси. Предел обнаружения —  $10^{-13}$  г/мл.

7. В.Д.Самойленко, Н.В.Разумова, Р.И.Персонов Штарк-эффект на узких провалах в полосах поглощения сложных молекул. Оптика и спектроскопия, 52, 580 (1982).
8. Л.А.Быковская, Ф.Ф.Литвин, Р.И.Персонов, Ю.В.Романовский Тонкая структура спектров флуоресценции хлорофилла «а», протохлорофилла и их феофитинов при селективном лазерном возбуждении. Биофизика, 25, 13 (1980).
9. N.A.Efremov, S.G.Kulikov, R.I.Personov and Yu.V.Romanovskii Line-narrowed spectra and kinetics of laser-excited delayed fluorescence of complex molecules in solid solutions Chem.Phys., 128, 9 (1988).
10. L.A.Bykovskaya, R.I.Personov, Yu.V.Romanovskii Luminescence analysis of complex organic materials based on resolved line spectra produced by selective laser excitation. Analytica Chimica Acta, 125, 11 (1981).
11. N.I.Ulitskii, B.M.Kharlamov, R.I.Personov Effect of high magnetic field on the degenerate S-S transitions of organic molecules in amorphous matrices via hole burning: Zn-phthalocyanine in polyvinylbutyral. Chem.Phys., 141, 441 (1990).
12. N.V.Gruzdev, E.G.Sil'kis, V.D.Titov, and Yu.G.Vainer Ultrafast dephasing of Resorufin in d-ethanol glass from 1.7 to 40 K studied by incoherent photon echo. J. of the Optical Society of America B, 9, 6, 941 (1992).
13. R.I.Personov Luminescence line narrowing and persistent hole Burning in organic materials: principles and new results. J.Photochem. Photobiol. A.Chem. 63, 321 (1992).
14. M.Orrit, J.Bernard and R.I.Personov High resolution spectroscopy of organic molecules in solids: from fluorescence line narrowing and hole burning to single molecule spectroscopy. J.Phys.Chem. (1993) (in press).

## Лаборатория молекулярной спектроскопии высокого разрешения и аналитической спектроскопии

Лаборатория была организована в 1989г. Зав. лабораторией - к.ф.-м.н. В.Г.Колошников. В состав лаборатории вошли группы лазерного атомно-флуоресцентного анализа (руководитель к.ф.-м.н. М.А.Большов), диодной лазерной спектроскопии (руководитель к.ф.-м.н. Ю.А.Курицын) и спектрального анализа металлов и сплавов (руководитель к.т.н. А.М.Лившиц), входившие ранее в состав существовавшей в Институте с момента его основания Лаборатории приборостроения, переименованной в 1981г. в Лабораторию аналитической спектроскопии (зав. лабораторией В.Г.Колошников), и группа новых методов микроволновой спектроскопии (руководитель к.ф.-м.н.Б.С.Думеш), входившая ранее в состав Лаборатории колебательных и вращательных спектров молекул (зав.лабораторией профессор М.Р.Алиев). 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 лаборатория состоит из четырех указанных выше групп, в которых работают 23 сотрудника (в том числе 10 кандидатов наук).

### Внутрирезонаторная спектроскопия

В 1973г. в лаборатории приборостроения были начаты исследования в области внутрирезонаторной лазерной спектроскопии (ВРЛС) (к.ф.-м.н. Е.Н.Антонов, к.ф.-м.н. В.Р.Мироненко, В.Г.Колошников), основы которой были заложены в работах сотрудников ФИАН Э.А.Свириденкова и А.Ф.Сучкова, опубликованных в 1970г. Отличительная особенность исследований в Институте спектроскопии состояла в использовании лазеров на красителях не импульсных, а непрерывного действия. Уже в первых работах было продемонстрировано, что использование таких лазеров позволяет значительно повысить чувствительность регистрации спектров поглощения и была предложена и экспериментально проверена методика проведения количественных измерений коэффициентов поглощения в линиях [1]. В работах В.Р.Мироненко и д.ф.-м.н. В.И.Юдсона (теоретический отдел) [2,3] был проведен детальный анализ вопроса о пределах обнаружения слабых линий поглощения методом ВРЛС, определяемых шумами многомодового лазера и системы регистрации. В этих работах была построена квантовая теория многомодово-

го лазера и было показано, что квантовые флуктуации в модах весьма велики ( $\Delta n \sim n$ , где  $n$ -число фотонов в моде). Существенным шагом в развитии метода ВРЛС, позволившим устранить ряд паразитных эффектов, влияющих на спектр генерации многомодового лазера (интерференционные эффекты, пространственно-селективное поглощение или рассеяние), явился переход к работе с непрерывным кольцевым лазером бегущей волны (к.ф.-м.н.А.А.Качанов) [4]. Внутрирезонаторный спектрометр, построенный на базе кольцевого лазера, позволил довести предел обнаружения слабых линий поглощения до  $K \sim 3 \times 10^{-11} \text{ см}^{-1}$  при спектральном разрешении  $\delta \nu \approx 0,03 \text{ см}^{-1}$  и точности абсолютных измерений частот в спектре  $0,003 \text{ см}^{-1}$  [5]. На этом спектрометре были проведены измерения слабых запрещенных переходов между высоковозбужденными состояниями в молекулярном кислороде и гелии.

### Атомно-флуоресцентный анализ материалов

Начиная с 1972г., в лаборатории проводились исследования по лазерному атомно-флуоресцентному методу анализа материалов (М.А.Большов, к.ф.-м.н. А.В.Зыбин, В.Г.Колошников, проф. С.Л.Мандельштам) [6]. В процессе этих исследований была проведена разработка и испытания нескольких типов перестраиваемых лазеров на красителях, изучены различные схемы возбуждения флуоресценции и механизмы тушения атомных возбужденных состояний, исследованы различные типы атомизаторов, определены предельные возможности метода. Экспериментально продемонстрирована возможность детектирования атомов свинца в газовой фазе при их концентрации на уровне  $3 \times 10^2 \text{ см}^{-3}$  [7]. Показано, что с использованием электротермического графитового атомизатора пределы обнаружения для ряда элементов в особо чистых материалах и природных объектах составляют  $10^{-8}$ — $10^{-11} \%$ . Совместно с лабораторией лазерно-спектрального приборостроения (зав.лабораторией к.ф.-м.н. О.Н.Компанец) был создан лазерный атомно-флуоресцентный аналитический спектрометр ЛАФАС-1 [8]. 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, С.Н.Руднев совместно с лабораторией гляциологии и геофизики Гренобльского университета, Франция, проф.К.Бутрон). Сложность

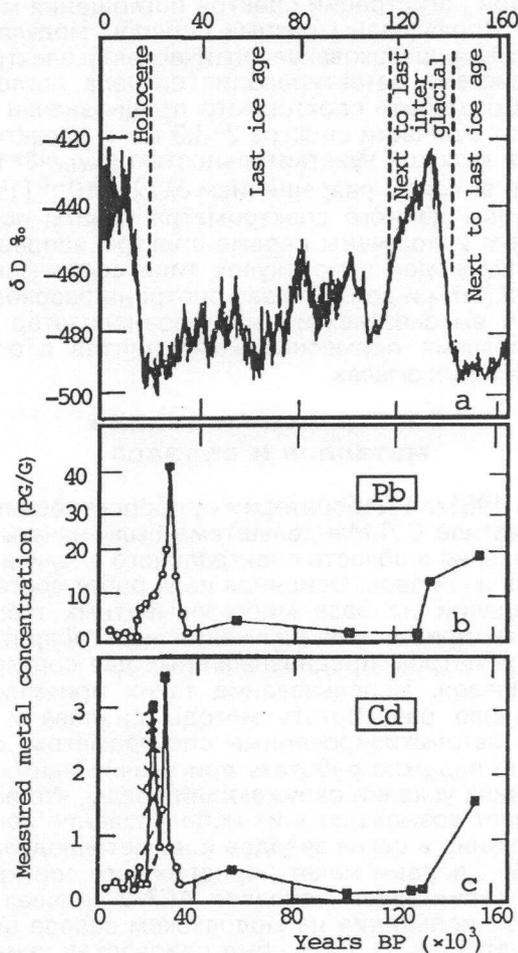


Рис. 4

а) Климатические вариации отношения дейтерий/водород в слоях льда Антарктики в течение последних 160000 лет. Это отношение отражает вариации средней температуры. Указаны также приблизительные границы климатических эпох. б), в) Вариации Pb и Cd в глубинных слоях льда Антарктики в тот же временной интервал. Данные получены на спектрометре ЛАФАС-1. Открытые кружки — данные, полученные при анализе образцов из скважины «Dome C», квадраты — из скважины «Восток». По осям отложены: X — годы до нашей эры, Y — концентрация металла, пг/г.

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. Содержание одного элемента в образце определялось за время ~3 минут, что позволило проанализировать несколько сотен образцов. 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» с 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 (рис. 4), так и о глобальном загрязнении планеты, связанном с антропогенной деятельностью [9].

### Диодная лазерная спектроскопия

Работы по исследованию возможностей применения перестраиваемых полупроводнико-

вых лазеров на халькогенидах свинца-олова для спектроскопии высокого разрешения в ИК-области спектра были начаты в Лаборатории приборостроения в 1969г. (д.ф.-м.н. И.И.Засавицкий, к.ф.-м.н. В.А.Агейкин, В.Г.Колошников, совместно с Физическим институтом им.П.Н.Лебедева (проф. А.П.Шотов) и Институтом физики высоких давлений (д.ф.-м.н. И.И.Лихтер).

На первом этапе были проведены исследования характеристик лазеров, работающих в импульсном режиме, при использовании для перестройки частоты генерации высокого гидростатического давления, магнитного поля, температуры. В процессе дальнейших исследований была продемонстрирована возможность регистрации спектров высокого разрешения при работе лазеров в импульсном режиме при азотных температурах (Ю.А.Курицын). Получены спектры молекул  $^{14}\text{NH}_3$  и  $^{15}\text{NH}_3$  с разрешением, ограниченным доплеровским уширением.

Дальнейшее развитие работ в области диодной лазерной спектроскопии связано с исследованием эффекта Зеемана в колебательно-вращательном спектре молекулы аммиака, не имеющей электронного магнитного момента [10]. Отсутствие последнего приводит к тому, что зеемановское расщепление оказывается чрезвычайно малым и составляет  $\sim 10^{-2}$   $\text{см}^{-1}$  в магнитном поле  $B \sim 500$  кГс. Эффект удалось зарегистрировать при использовании импульсного магнита и синхронизированного с ним диодного лазера, также работающего в импульсном режиме (рис. 5).

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

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

С использованием этого спектрометра был выполнен ряд исследований спектров молекул типа сферического волчка. Изучены запрещенные переходы в молекуле  $\text{GeH}_4$  [11]. Подробно исследованы (к.ф.-м.н.Д.А.Садовский, В.М.Кривцун) критические явления в колебательно-вращательных спектрах, возникающие в узких интервалах изменения J в процессе возрастания вра-

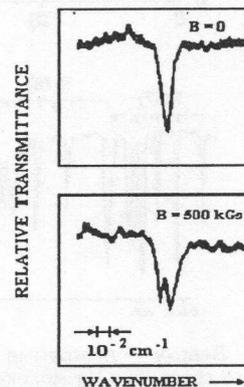


Рис. 5

Спектры поглощения молекулы  $\text{NH}_3$  в области линии  $\text{asR}(4,1)$  колебательной полосы  $\nu_2$  в отсутствие магнитного поля (вверху) и в магнитном поле  $B=500$  кГс (внизу). Спектры получены с помощью импульсного диодного лазера на PbSnTe, работающего при  $T=60$  К. Длительность импульса тока накачки 100 мкс, скорость перестройки  $0,025 \text{ см}^{-1}/\text{мкс}$ . Спектры зарегистрированы за один импульс.

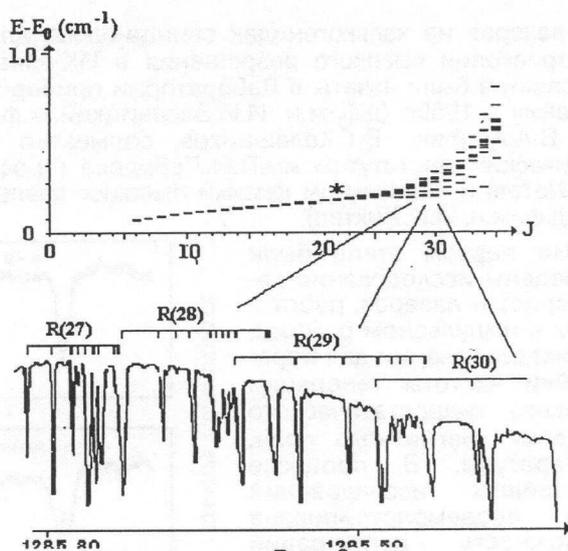


Рис. 6

Вверху — диаграмма энергетических уровней колебательно-вращательного состояния  $\nu_3$  молекулы  $\text{CF}_4$ ; внизу — спектр высокого разрешения R-ветви полосы  $\nu_3$ , полученный с помощью спектрометра на перестраиваемых диодных лазерах. Звездочкой на диаграмме уровней отмечено состояние  $J=22$ , отвечающее критической точке. При  $J > 22$  наблюдается качественное изменение характера вращательного движения, приводящее к изменению структуры колебательно-вращательного спектра.

щательного возбуждения (рис. 6). К числу изученных критических явлений относятся бифуркации в полосе  $\nu_3$  и «дьявольская точка» в области пересечения поверхностей вращательной энергии состояний  $\nu_1$  и  $\nu_3$  молекулы  $\text{SnH}_4$ , кроссовер в  $\nu_3$  ( $F_2$ ) молекулы  $\text{CF}_4$  [12].

Отдельный цикл работ был посвящен исследованиям нестационарных молекулярных процессов. В том числе: спектроскопическое исследование радикалов  $\text{NH}_2$ , образующихся при импульсном фотоллизе аммиака (Ю.А.Курицын, В.М.Кривцун); исследование динамики бесстолкновительного возбуждения молекул в области нижних колебательно-вращательных уровней при воздействии на молекулы интенсивного ИК-излучения (Ю.А.Курицын, к.ф.-м.н. И.Пак, совместно с д.ф.-м.н. Г.Н.Макаровым) [13]; исследование ИК-спектров поглощения молекул  $\text{CrO}_2\text{Cl}_2$  в области квазиконтинуума (Ю.А.Курицын, В.М.Кривцун, Е.П.Снегирев совместно с д.ф.-м.н. А.А.Пурецким) [14].

Наконец, следует упомянуть разрабатывавшиеся в лаборатории методы спектрального анализа газов с использованием диодных лазеров (Ю.А.Курицын, В.М.Кривцун, Е.П.Снегирев). В однопроходных и многоходовых кюветах проводились определения примесей  $\text{NH}_3$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ , в воздухе и примеси  $\text{PH}_3$  в  $\text{GeH}_4$ . Показано, что достижим относительный предел обнаружения на уровне  $10^{-7}$  %.

### Микроволновая спектроскопия

В группе новых методов микроволновой спектроскопии разработан радиоспектрометр на базе оротрона (аббревиатура: Открытый Резонатор Отражающая Решетка), являющегося высокостабильным, перестраиваемым в широком диапазоне генератором излучения в миллиметровой области спектра (Б.С.Думеш, Л.А.Сурин совместно с ВНИИФТРИ). Оротрон является лазером на свободных нерелятивистских электронах, в резонатор которого помещается исследуемый

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+3,3 мм и характеризуется высокой чувствительностью ( $K_{\min} \sim 3 \times 10^{-10} \text{ см}^{-1}$ ) и высоким разрешением  $\delta\lambda/\lambda \leq 10^{-6}$  [15]. С помощью данного спектрометра начаты исследования и получены первые спектры запрещенных переходов в молекулах типа сферического волчка ( $\text{SiH}_4$  и др.). На базе оротрона разрабатывается высокоселективный газоанализатор для определения примесных компонентов в сложных газовых смесях.

### Спектральный анализ металлов и сплавов

В 1981г. в Лаборатории приборостроения по инициативе С.Л.Мандельштама были начаты исследования в области 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 на металлдоворах. В 1986г. первый макет передвижного сортировщика алюминиевых сплавов АСА-2 прошел успешные испытания на Подольском заводе цветных металлов. В 1988г. был разработан универсальный передвижной сортировщик цветных и черных сплавов «Тест». В 1992г. закончена разработка (А.М.Лившиц, А.В.Пелезнев, совместно с лабораторией О.Н.Компанца) портативного универсального сортировщика сплавов ПАПУАС-2 и в настоящее время в Институте выпущена малая серия этих приборов.

Исследования и разработки, проводимые в настоящее время в лаборатории молекулярной спектроскопии, планируется продолжить в ближайшие годы, сосредоточив основное внимание на развитии экологических приложений методов спектрального анализа. При этом предполагается, что наряду с расширением областей применения имеющихся высокочувствительных и высокоселективных методов (лазерный атомно-флуоресцентный метод, диодная спектроскопия, микроволновая спектроскопия) для анализа конкретных объектов, значительные усилия будут направлены на использование современных технических возможностей и идей классической и лазерной спектроскопии для разработки новых методов и сравнительно простых приборов, позволяющих достаточно быстро, надежно и с необходимой чувствительностью проводить анализы объектов окружающей среды.

Лаборатория поддерживает научные контакты с рядом лабораторий и научных учреждений России и зарубежных стран (ИОФАН, ГИРЕД-МЕТ, ВНИИФТРИ, Гренобльский университет (Франция), Институт спектроскопии и прикладной спектроскопии (Дортмунд, Германия), Лоуренсовская ливерморская национальная лаборатория (США) и др.).

## Литература

1. Antonov E.N., Koloshnikov V.G., Mironenko V.R. Quantitative measurement of small absorption coefficients in intracavity absorption spectroscopy using a CW dye laser. *Optics Commun.*, 15, 99 (1975).
2. Мироненко В.Р., Юдсон В.И. Квантовая статистика многомодовой генерации и шума в методе внутриврезонаторной лазерной спектроскопии. *ЖЭТФ*, 79, 1174 (1980).
3. Мироненко В.Р. Теоретические пределы порогов чувствительности внутриврезонаторной лазерной абсорбционной спектроскопии. *Квантовая электроника*, 12, 1676 (1985).
4. Kachanov A.A., Plakhotnik T.V. Intracavity spectrometer with a ring travelling-wave dye laser: reduction of detection limit. *Optics Commun.*, 47, 257 (1983).
5. Качанов А.А., Мироненко В.Р., Пашкович И.К. Квантовый порог чувствительности внутриврезонаторного лазерного спектрометра бегущей волны. *Квантовая электроника*, 16, 146 (1989).
6. Большов М.А., Гузев 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*, 19, 821 (1973).
7. Bolshov M.A., Zybin A.V., Koloshnikov V.G., Vassetsov M.V. Detection of extremely low lead concentrations by laser atomic fluorescence spectrometry. *Spectrochimica Acta*, 36B, 345 (1981).
8. 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., Shishkovskii V.S., Boutron C.F. Automated laser excited atomic fluorescence spectrometer for determination of trace concentrations of elements. *Spectrochimica Acta*, 44B, 253 (1989).
9. а) 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.*, 61, 1758 (1989).
- б) Bolshov M.A., Koloshnikov V.G., Rudnev S.N., Boutron C.F., Gorchach U., Patterson C.C. Detection of trace amounts of toxic metals in environmental samples by laser-excited atomic fluorescence spectrometry. *J. Anal. Atomic Spectrometry*, 7, 99 (1992).
10. Koloshnikov V.G., Kuritsyn Yu.A., Pak I., Ulitskii N.I., Kharlamov B.M., Britov A.D., Zaslavitskii I.I., Shotov A.P. Zeeman effect in the IR spectrum of a molecule without an electronic moment. Observation with a tunable diode lasers. *Opt. Commun.*, 35, 213 (1980).
11. Cheglokov A.E., Kuritsyn Yu.A., Snegirev E.P., Ulenikov O.N., Vedeneva G.V. High-resolution spectroscopy of the  $\nu_2$  Q-branch of GeH<sub>4</sub> with a computer-assisted, pulsed-diode laser spectrometer. *J.Mol.Spectrosc.*, 105, 385 (1984).
12. а) Даварашвили О.И., Жилинский Б.И., Кривцун В.М., Садовский Д.А., Снегирев Е.П. Экспериментальное изучение последовательности квантовых бифуркаций, приводящей к перевороту вращательного мультиплета. Письма в *ЖЭТФ*, 51, 17 (1990).
- б) Krivtsun V.M., Sadovskii D.A., Zhilinskii B.I. Critical phenomena and diabolic points in rovibrational energy spectra of spherical top molecules. *J.Mol.Spectrosc.*, 139, 126 (1990).
13. а) Апатин В.М., Кривцун В.М., Курицын Ю.А., Макаров Г.Н., Пак И., Засавицкий И.И., Шотов А.П. Диодная спектроскопия молекул SF<sub>6</sub>, охлажденных в импульсной струе, при ИК многофотонном возбуждении. Письма в *ЖЭТФ*, 37, 365 (1983).
- б) Курицын Ю.А., Макаров Г.Н., Пак И., Сотников М.В. Исследование бесстолкновительного возбуждения молекул SF<sub>6</sub> и NH<sub>3</sub> в интенсивном ИК лазерном поле с помощью перестраиваемого диодного лазера. *ЖЭТФ*, 94, 65 (1988).
14. Евсеев А.В., Кривцун В.М., Курицын Ю.А., Макаров А.А., Пурецкий А.А., Рябов Е.А., Снегирев Е.П., Тяж В.В. ИК-спектр поглощения молекул CrO<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>, приготовленных в высоколежащем состоянии колебательного квазиконтинуума. *ЖЭТФ*, 87, 111 (1984).
15. Dumesh B.S., Kostromin V.P., Rusin F.S., Surin L.A. Highly sensitive millimetre-wave spectrometer based on an orotron. *Meas.Sci.Technol.*, 3, 873 (1992).

## Тематическая группа «Колебательные спектры молекул»

Тематическая группа «Колебательные спектры молекул» возникла в Отделе молекулярной спектроскопии в результате целого ряда структурных реорганизаций. Большинство сотрудников этой группы до ее организации (1969—1980) работали в Лаборатории молекулярной спектроскопии (зав.лабораторией к.ф.-м.н. Х.Е.Стерин) и Секторе микроволновой спектроскопии (зав.сектором к.ф.-м.н.В.Б.Белянин, позже к.ф.-м.н.Б.Д.Осипов), а затем (1985—1988гг.) в Лаборатории колебательных и вращательных спектров молекул (зав.лабораторией д.ф.-м.н.М.Р.Алиев).

В настоящее время в группе работают 6 научных сотрудников, в том числе 1 доктор и 2 кандидата наук. Руководитель группы — д.х.н. Я.М.Кимельфельд. В группе исследуются колебательные и микроволновые спектры молекул. В области колебательной спектроскопии работы проводятся по двум следующим направлениям: исследование методом ИК спектроскопии молекул и молекулярных комплексов в сжиженных простых газах при низких температурах и исследование методом комбинационного рассеяния света (КРС) адсорбции и катализа. Проведенные широкие исследования всевозможных комплексов (в том числе и реакционноспособных) в криорастворах благородных газов и в твердых матрицах при низких температурах (Я.М.Кимельфельд, к.х.н. Е.М.Смирнова) позволили получить новую информацию о спектральных проявлениях комплексообразования, в частности, комплексообразования с формированием водородных связей (Н-связей). Так, для растворов Н-комплексов в жидких благородных газах и азоте характерно резкое увеличение интенсивностей ряда линий

КР и сужение полосы валентного колебания ХН-связи в ИК спектрах [1].

Изучение спектров КР большого числа молекул адсорбированных в вакууме при низких температурах на металлических пленках (к.ф.-м.н.А.В.Бобров, к.ф.-м.н.Л.М.Туманова) дало возможность впервые наблюдать «гигантское» увеличение интенсивностей линий КР при адсорбции на металлах в вакууме и подтвердить заметный вклад химического взаимодействия в уширение линий КР [2].

В дальнейшем явление «гигантского» усиления линий КР при адсорбции было практически использовано для исследования in situ гетерогенного катализа, что позволило уверенно зарегистрировать спектры промежуточных соединений и подтвердить универсальность метода КР в этом отношении [3].

Учитывая большие возможности спектроскопического исследования в растворах в сжиженных простых газах межмолекулярных взаимодействий, а также реакционной способности и механизмов химических реакций, в настоящее время в группе ведутся работы по исследованию спектров КР криорастворов Н-комплексов. К.х.н. С.Г.Казаряном успешно начаты работы по исследованию межмолекулярных взаимодействий в полиэтиленовых матрицах [4]. Проводятся также работы по исследованию и поиску перспективных катализаторов и исследованию каталитических превращений с целью выбора оптимальных условий реакций, представляющих интерес для промышленности. Одновременно уточняется механизм «гигантского» усиления линий КР.

В области микроволновой спектроскопии

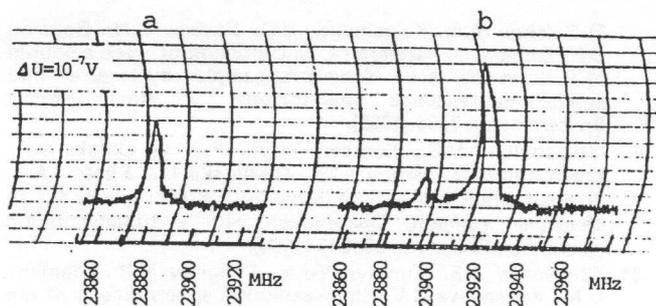


Рис. 7

Широко известна регистрация спектров по поглощению или излучению. Приведен впервые зарегистрированный по изменению статической диэлектрической проницаемости спектр аммиака. Приведены две записи линии  $J, K=3, 3$  инверсионного спектра молекулы  $^{14}\text{ND}_3$  при давлении газа 0,1 тор в постоянном электрическом поле  $U=200$  В (а) и  $U=600$  В (б). В последнем случае видны две штарковские компоненты с  $M=2$  и  $M=3$ .

важные результаты были получены в Институте под руководством д.ф.-м.н. М.Р.Алиева еще до создания тематической группы Колебательные спектры молекул. В цикле работ М.Р.Алиева по вычислению колебательно-вращательной энергии молекул была получена методом контактных преобразований общая простая формула для произвольных коэффициентов колебательно-вращательного взаимодействия, позволяющая проводить вычисление этих коэффициентов параллельно с расчетом нормальных колебаний молекул. Им разработан общий метод определения симметрии коэффициентов колебательно-вращательного взаимодействия и ангармоничности потенциальной функции молекул, основанный на технике неприводимых тензорных операторов для точечных групп. В пионерской работе по теории запрещенных спектров неполярных молекул [5], было показано, что вследствие эффекта центробежного искажения первого порядка чисто вращательные спектры дипольных переходов в основном состоянии может иметь не

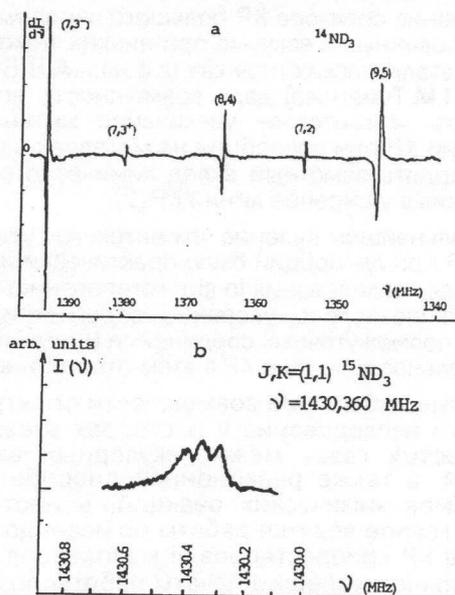


Рис. 8

Фрагменты инверсионных спектров D-аммиака, полученные на дециметровом штарковском спектрометре Института спектроскопии РАН (при давлении газа ниже  $10^{-3}$  тор); а) для  $^{14}\text{ND}_3$  наблюдается расщепление  $K=3$  в виде двух компонент  $7,3^+$  и  $7,3^-$ , которое в обычном аммиаке отсутствует (в теорию таких расщеплений внес заметный вклад М.Р.Алиев). б) Сверхтонкая структура для линии  $J, K=1, 1$   $^{15}\text{ND}_3$ , вызванная чисто D-квadrупольным взаимодействием (впервые зарегистрирована в Институте спектроскопии РАН).

только метан, но и все неполярные молекулы, принадлежащие к точечным группам  $D_n$ ,  $D_{2d}$ ,  $D_{3h}$ ,  $S_4$ ,  $T$  и  $T_d$ . В цикле работ по теории запрещенных спектров (М.Р.Алиев и к.ф.-м.н. В.М.Михайлов) было показано, что эффекты колебательно-вращательного взаимодействия, ангармонизма и даже ядерных сверхтонких взаимодействий приводят к существенному ослаблению правил отбора в рамках жесткой гармонической модели молекулы.

В 1972г. Б.Д.Осипов и С.Н.Мурзин обнаружили эффект изменения статической диэлектрической проницаемости в сильном поле накачки [6]. На рис. 7 приведены впервые зарегистрированные по изменению статической диэлектрической проницаемости линии инверсионного спектра аммиака. Обнаруженный эффект изменения диэлектрической проницаемости открывает возможность принципиально нового способа регистрации спектров молекул.

В 1977г. Б.Д.Осиповым был создан оригинальный импульсный спектрометр двойного резонанса [7], на котором были выполнены обширные исследования квадрупольных спектров ряда молекул (к.ф.-м.н. М.Н.Грабойс).

В настоящее время в тематической группе Колебательные спектры молекул проводятся исследования микроволновых спектров молекул, представляющих астрофизический интерес. Полученные к настоящему времени данные по чисто инверсионным спектрам дейтерированных изотопмеров аммиака (С.Н.Мурзин, О.Н.Степанов) являются наиболее точными и полными [8]. Фрагменты таких спектров показаны на рис. 8.

Группа поддерживает тесные научные контакты с сотрудниками ИХФ РАН, ФИАН, ИНЭОС, МИФИ, а также зарубежными научными учреждениями: Институтом физической химии и электрохимии (Прага, Чехия), Болонским университетом (Италия), Ноттингемским университетом (Великобритания); Герцберговским институтом астрофизики (Канада).

## Литература

1. а) Я.М.Кимельфельд. Успехи химии, 57, вып.8, 1273 (1988).  
б) Ya.M.Kimel'fel'd в кн.: «Molecular interactions» ed.Ratajczak and Orville-Thomas (Wiley), 3, 343 (1982).  
в) Ya.M.Kimel'fel'd в кн.: «Vibrational Spectra and Structure» ed.J.R.Durig, 10, 315 (1991).
2. А.В.Бобров, Л.М.Мостовая в кн.: «Материалы 2 Всесоюзной конференции по спектроскопии КР» М., 1978, с.51..  
А.В.Бобров, Ya.M.Kimel'fel'd and L.M.Mostovaya (Tumanova) J.Mol.Struct., 60, 431(1980).
3. А.В.Бобров, Л.С.Глебов и др., ДАН, 284, 1158 (1985),  
А.В.Бобров, Ya.M.Kimel'fel'd, L.S.Glebov et al., Chem.Phys.Lett., 118, 156 (1985); Teubner-Texte zur Physik, Band 20, Leipzig, 1988, p.192.
4. A.I.Cooper, S.G.Kazarian, M.Poliakoff. Supercritical fluid impregnation of polyethylene films, a new approach to studying equilibria in matrices; the hydrogen bonding of fluoroalcohols to  $(\eta^5\text{-C}_5\text{Me}_5)\text{Ir}(\text{CO})_2$  and the effect on C-H activation. Chem. Phys.Lett., 206, 175 (1993).
5. М.Р.Алиев. О чисто вращательных спектрах неполярных молекул в основном колебательном состоянии. Письма в ЖЭТФ, 14, 600 (1971).
6. С.Н.Мурзин, Б.Д.Осипов. Изменение статической диэлектрической проницаемости газа в сильном резонансном поле. Оптика и спектроскопия, 32, 430 (1972).
7. Б.Д.Осипов. Магнитная сверхтонкая структура квадрупольного спектра молекулы  $\text{CH}_3\text{I}$ . Письма в ЖЭТФ, 25, 14 (1977).
8. С.Н.Мурзин, О.Н.Степанов. Инверсионные спектры  $^{14}\text{ND}_3$  и  $^{15}\text{ND}_3$  в области частот от 1.29 до 2.56 Гц. Оптика и спектроскопия, 69, 497 (1990).

# ОТДЕЛ СПЕКТРОСКОПИИ ТВЕРДОГО ТЕЛА

Отдел существует с 1985 года и состоит сейчас из трех лабораторий: лаборатории спектроскопии кристаллов (зав. лабораторией д.ф.-м.н. Г.Н.Жижин), лаборатории конденсированных сред (зав. лабораторией д.ф.-м.н. Б.Н.Маврин), лаборатории спектроскопии поверхностных состояний (зав. лабораторией д.ф.-м.н. В.А.Яковлев). В 1985-1987 гг. в его со-

ставе была также лаборатория спектроскопии неупорядоченных сред (зав. лабораторией д.ф.-м.н. Е.А.Виноградов). С момента образования отдела и по настоящее время его возглавляет проф. Г.Н.Жижин. Лаборатория проф. В.А.Яковлева образовалась с начала 1993 года, выделившись из лаборатории спектроскопии кристаллов.

## Лаборатория спектроскопии кристаллов

В начале 1969 г. была создана лаборатория спектроскопии кристаллов ИСАН, ставившая задачей развитие методов инфракрасной (ИК), длинноволновой инфракрасной (ДИК), 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.), спектроскопии двумерных систем.

Разработку новой автоматизированной спектральной аппаратуры, обеспечивающей широкий диапазон длин волн ( $1 + 500$  мкм) в сочетании с высоким разрешением ( $0,001$  см<sup>-1</sup>), высокую фотометрическую точность (0,3%) с рекордно высокой обнаружительной способностью к спектрам монослоевых и субмонослоевых поверхностных пленок органических и неорганических веществ на металлах и диэлектриках.

### Спектроскопия фазовых переходов

Одним из наиболее изучаемых физических явлений все годы существования лаборатории были фазовые переходы в кристаллах органических и неорганических веществ: обнаружение ранее неизвестных фазовых переходов [1-5], впервые предложено определять температурный ход параметра порядка в окрестности фазовых переходов по интенсивности фононных линий в ДИК и КРС [6-9], по давидовскому и Бете-расщеплениям внутримолекулярных колебаний [10].

Рассеяние колебательных возбуждений на квазистатических флуктуациях параметра порядка было обнаружено по изменению формы контура ряда КРС и ИК линий TlInS<sub>2</sub> и TlGaSe<sub>2</sub> [11, 12], по ДИК спектрам TlGaSe<sub>2</sub> обнаружен эффект стабилизации сегнетофазы вблизи поверхности [13]. Отдельный цикл составляют исследования КРС фононных спектров и их перестроек с изменением гидростатического давления до 12 кбар в полупроводниковых кристаллах (около 50 составов), относящихся к рядам A<sup>III</sup>B<sup>V</sup>, A<sup>III</sup>B<sup>III</sup>C<sub>2</sub>V<sup>VI</sup> в некоторых из которых были обнаружены ранее неизвестные фазовые переходы. В частности, из-за уменьшения ширины запрещенной зоны под

давлением, часть этих кристаллов изучалась при возбуждении КРС спектра в ИК области еще до появления фурье-раман спектроскопии, хотя тогда же и возникла идея этого метода, которая была проанализирована теоретически [14].

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 создан комплекс автоматизированных ИК спектрометров, перекрывающий широкий спектральный диапазон от 0,8 до 50 мкм с возможностью расширения до 500 мкм, с разрешением до  $0,005$  см<sup>-1</sup>. Среди них:

АВИКС — вакуумный ИК спектрометр высокого разрешения (до  $0,02$  см<sup>-1</sup>) для области спектра  $0,8 + 50$  мкм. Построен совместно с ГОИ и ГАО (Пулково).

УФС-02 — фурье-спектрометр высокого разрешения (до  $0,05$  см<sup>-1</sup>) для области спектра  $0,9 + 50$  мкм с возможностью расширения спектрального диапазона в длинноволновую область до 500 мкм. Разработан совместно с ЦКБ УП НТО АН СССР, которое изготовило их 3 экземпляра.

ИКСВ — ИК спектрометр среднего разрешения (до  $0,3$  см<sup>-1</sup>, обл.  $1 + 25$  мкм) создан на базе серийного спектрометра ЛОМО ИКС-31 и ИВК «Вихрь» (СКБ АП АН СССР) — первый в СССР спектрофотометр с погрешностью шкалы пропускания не более 0,3%. На основе этой разработки ЛОМО в 1981 году выпустило малую серию приборов ИКСВ-1 (5 шт.) для АН СССР.

В 1976 году из лаборатории выделилась группа сотрудников, положившая начало отделу спектрального приборостроения в ЦКБ УП АН СССР, ставшая специализироваться на разработках фурье-спектрометров. Тесное научное и техническое сотрудничество ИСАН с ЦКБ УП АН России сохраняется до сих пор.

### Фурье-спектроскопия высокого разрешения в исследовании кристаллов с редкоземельными ионами.

В 1984-85 гг. на построенном в ЦКБ УП АН УФС-02 были получены первые результаты и начаты исследования кристаллов с редкоземельными ионами [15]. С 1989 г. эти работы стали про-

водиться и на фурье-спектрометре канадского производства BOMEM DA3.002 с рабочей областью от далекого ИК диапазона до ультрафиолета и с разрешением  $0,0026 \text{ см}^{-1}$ .

Обнаружена и исследована сверхтонкая структура (СТС) в оптическом спектре актуального лазерного кристалла  $\text{LiYF}_4\text{-Ho}$  [16]. Зарегистрирована рекордно узкая неоднородно уширенная спектральная линия в твердом теле с шириной  $0,007 \text{ см}^{-1}$ . Впервые отмечены ранее не наблюдавшиеся особенности СТС: СТС с нерегулярными интервалами, сложная группировка линий, оптические переходы, для которых запрет по симметрии снимается сверхтонкими взаимодействиями.

Обнаружена тонкая структура сверхтонких компонент в оптическом спектре иона  $\text{Ho}^{3+}$  в кристалле  $\text{LiYF}_4$  [17], обусловленная неоднородным изотопным составом по литию ( $^7\text{Li}$  и  $^6\text{Li}$ ) во второй координационной сфере примесного иона  $\text{Ho}^{3+}$ . Это первое наблюдение изотопической структуры в оптическом спектре примесного центра, обусловленной изотопами не центрального иона, а окружения.

Рис. 9 иллюстрирует сказанное: при увеличении разрешения фурье-спектрометра выявляется сначала сверхтонкая, затем изотопическая структура.

Методом фурье-спектроскопии высокого разрешения обнаружено и исследовано магнит-

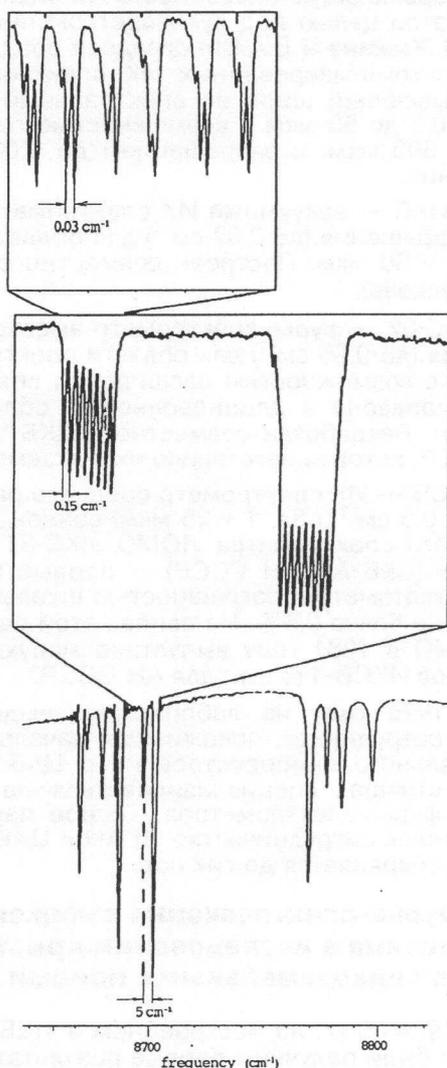


Рис. 9

ное упорядочение в ряде соединений, родственных высокотемпературным сверхпроводникам [18]. Впервые в исследовании фазовых переходов наблюдались спектральные проявления ближнего порядка при  $T \sim T_c$ ; удвоение магнитной ячейки при фазовом переходе, упорядочение редкоземельной подсистемы, спин-переориентационные фазовые переходы первого рода. Предложено использовать спектральный метод для выбора между возможными типами магнитных структур. Найдено, что в сопутствующих ВТСП «зеленых фазах», как и в самих ВТСП, имеется магнитная неустойчивость, проявляющаяся в спинпереориентационных переходах и в сосуществовании двух различных магнитных структур в широком интервале температур.

### 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 для этих целей объясняется ее 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 ионноковалентных кристаллов (около 30), исследовано влияние тонких проводящих в диэлектрических слоях на характер дисперсионных кривых [19]. В ходе этих исследований обнаружено тушение поверхностных поляритонов пленкой металла [20], впервые подтверждено предсказанное теоретически [21] расщепление линии поверхностного поляритона при резонансе с фононом переходного слоя, изменена корневая зависимость расщепления от толщины [22]. Спектроскопия поверхностных поляритонов использована для получения оптических постоянных тонких пленок и переходных слоев на поверхности диэлектриков (пленки металлов и «искусственных диэлектриков», слои после ионной имплантации поверхности кварца [23]).

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 [23, 24]), для исследования фазовых переходов [25].

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  $\text{CO}_2$ -лазером с перестройкой частоты [26] (рис. 10а). Позднее призмное возбуждение было заменено апертурным [27], что позволило развить метод интерференционных измерений оптических постоянных пленок и поверхностей проводящих материалов (металлов [28], высокотемпературных сверхпроводников [29]), а также диэлектриков в области спектра поверхностных поляритонов [30] (рис. 10б).

Ограничение области спектра, присущее лазерным источникам, было устранено применением фурье-спектрометров, где ПЭВ возбуждались тепловым излучением приборного источника, а де-

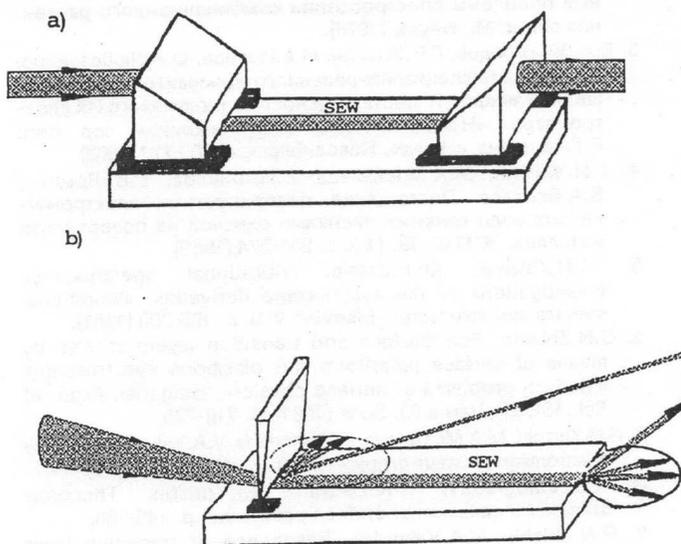


Рис. 10

тектирующая система прибора позволяла регистрировать спектры монослоевых и субмонослоевых пленок в условиях решеточного и апертурного возбуждения ПЭВ [31]. Таким путем изуче-

ны колебательные ИК спектры лэнгмюровских пленок (вплоть до монослоевых и окислов на поверхности металлов. Проведено сравнение с традиционным методом спектрального исследования сверхтонких слоев — «отражательно-абсорбционной спектроскопией», выявившее преимущество ПЭВ по чувствительности. В последнее время было показано, что ПЭВ можно возбуждать в ближней ИК и видимой области спектра [32].

Комплексное изучение оптических свойств методами пропускания, отражения, НРВО и спектроскопии ПЭВ было применено для сверхтонких (0,6–7 нм) пленок ниобия и меди, обладающих металлической проводимостью. Обнаружены осцилляции проводимости на постоянном токе и на оп-

тических (ИК) частотах с периодом по толщине 0,6 нм (Nb) и 0,2 нм (Cu), которые можно объяснить квантоворазмерными эффектами [33].

## Лаборатория колебательной спектроскопии конденсированных сред

Лаборатория была организована в 1969 г. как лаборатория молекулярной спектроскопии (зав. лаб. к.ф.-м.н. Х.Е.Стерин), которая в 1987 г. была преобразована в лабораторию колебательных спектров конденсированных сред (зав. лаб. д.ф.-м.н. Б.Н.Маврин). Сейчас в лаборатории работают 8 сотрудников, образующие три группы (к.ф.-м.н. О.И.Капуста, д.ф.-м.н. Б.Н.Маврин, д.ф.-м.н. В.Б.Подобедов), в которых ведутся эксперименты по комбинационному (КР) и гиперкомбинационному (ГКР) рассеянию света в кристаллах, пленочных структурах, стеклах и жидкостях, а также в молекулярных адсорбатах на поверхности металлов.

С момента образования лаборатории одним из основных направлений в ее тематике было изучение объемных, а затем и поверхностных поляритонов. Эти работы велись в тесном сотрудничестве с теоретическим отделом. Из наиболее интересных результатов можно выделить: 1) наблюдение поляритонного Ферми-резонанса [34], заключающегося в возникновении аномального хода поляритонной дисперсии и щели в области двухфононных состояний, 2) обнаружение интерференционных мод и изучение трансформации поляритонных ветвей в семейство дисперсионных кривых волноводных р- и s-мод при переходе от кристалла к тонкой пленке [35], 3) обнаружение колебательных поляритонов и зависимости их частот от волнового вектора в неупорядоченных средах (стеклах и жидкостях) [36, 37].

В лаборатории спектроскопия КР систематически привлекается для диагностики свойств полупроводников. Была установлена корреляция между напряжениями и типом изоэлектронной примеси в эпитаксиальных пленках арсенида галлия. Найдена эффективная фотогенерация носителей и их сильное взаимодействие с решеткой в гидrogenезированных и имплантированных кристаллах арсенида галлия. Обнаруже-

на фотокристаллизация аморфных полупроводников [38]. В спектрах КР сверхтонких аморфных сверхрешеток обнаружена интерфейсная мода, обусловленная границей между периодами сверхрешетки кремний — двуокись кремния.

При адсорбции молекул на поверхности металла сечение КР на молекулярных колебаниях может усиливаться на несколько порядков. В лаборатории впервые исследованы спектры гигантского КР ряда молекул углеводородов, адсорбированных на поверхности серебра, с целью изучения природы эффекта гигантского КР и физико-химических процессов на поверхности металла. Выяснен механизм химического взаимодействия молекул предельных углеводородов с поверхностью металла. Обнаружен аномальный изотопический сдвиг частот в метане [39] и каталитические и фотокаталитические переходы в этане и этилене с ростом температуры. Оценен вклад ( $\sim 10^2$ ) молекулярного механизма в усиление интенсивности КР этилена. Определены геометрическая структура и энергетические характеристики активных центров усиления КР.

Одним из главных достижений лаборатории является развитие метода нелинейной колебательной спектроскопии ГКР, связанной с кубической нелинейностью среды [40]. С помощью этого метода обнаружены запрещенные в КР и ИК поглощении колебания, определены оптические и молекулярные параметры ряда материалов. Обнаружены колебательные поляритоны и продольно-поперечное расщепление дипольных колебаний в стеклах и жидкостях, поляритонные Ферми-резонансы и поляритон-колебательные резонансы в центросимметричных средах. Предложена и обоснована новая интерпретация колебательных спектров стекол и жидкостей, исходя из усредненной симметрии среды [41].

В последние годы после открытия высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП) сначала в куп-

ратных оксидах (1986 г.) а затем в фуллеридах (1991 г.) в тематике лаборатории появилось новое направление — спектроскопия КР ВТСП-материалов. Кроме корректного описания спектров (частот, ширины и отнесения полос, зависимости фонновых спектров и электронного континуума от температуры и плотности носителей), мы хотели изучить взаимодействие электронного континуума с фонновой подсистемой, выявить колебания с наибольшей электрон-фононной силой связи, а также в случае фуллеридов исследовать межмолекулярные взаимодействия, влияющие на температуру сверхпроводящего перехода. Что касается купратных ВТСП, мы нашли корреляцию между спектрами КР и температурой сверхпроводящего перехода, обнаружили влияние фотоиндуцированной плазмы на фонновый спектр, предложили метод дистанционной диагностики степени упорядоченности и сверхпроводящих свойств ВТСП-пленок [42]. В спектрах КР внутри- и межмолекулярных мод чистых и легированных фуллеридов, обнаружены [43] Бетерасщепление, смещения полос за счет переноса заряда при легировании, резонанс Фано с электронным континуумом и спектры второго порядка. Определены механизмы резонансного КР и обнаружена деструктурированная интерференция электронных вкладов. Построены межмолекулярные потенциалы.

Лаборатория активно участвовала в создании первых отечественных спектрометров КР с лазерным возбуждением (ДФС-24 и ДФС-42). В лаборатории были построены первые в стране оригинальные макеты лидара и установок для многоканальной и скоростной регистрации спектров КР.

В лаборатории подготовлено и защищено 2 докторских и 4 кандидатских диссертации.

### Монографии отдела спектроскопии твёрдого тела

1. Х.Е.Стерин, В.Т.Алексамян, Г.Н.Жижин. Каталог спектров КРС углеводородов. М., 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 p.
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. Светильные спектральные приборы. Физматгиз, «Наука», Москва, 1988, 263 с.

### Переводные книги под редакцией Г.Н.Жижины.

1. Инфракрасная спектроскопия высокого разрешения. Сборник статей, перевод с английского и французского, составитель и редактор Г.Н.Жижин, с предисловием и вступительной статьей (стр. 5-18) редактора. Изд-во «Мир», 1972.
2. А.Пуле, Ж.-П.Матье. Колебательные спектры и симметрия кристаллов. Составитель, редактор перевода, автор предисловия, примечаний и библиографических дополнений Г.Н.Жижин, Изд-во «Мир», 1973.
3. Р.Белл. Введение в фурье-спектроскопию (предисловие, дополнения и редактирование перевода с английского), «Мир», Москва, 1985.
4. Стэйвели, Парсонидж. Беспорядок в кристаллах, «Мир», Москва, 1982, в двух томах (предисловие и редактирование перевода с английского).

### Обзоры отдела спектроскопии твёрдого тела

1. Г.Н.Жижин. Спектроскопия низкотемпературных кристаллических фаз органических веществ. Кристаллография, 18, № 4, стр. 769-778 (1973).
2. Б.Н.Маврин, Х.Е.Стерин. Ширина и форма линии комбинационного рассеяния на поляритонах. В сб.: Современ-

ные проблемы спектроскопии комбинационного рассеяния света. М., Наука, (1978).

3. Е.А.Виноградов, Г.Н.Жижин, И.А.Иванов, О.А.Любезников. Применение специализированного вычислителя для повышения точности и чувствительности однолучевого ИК спектрометра. «Новые методы спектроскопии» под ред. С.Г.Раутиана, «Наука», Новосибирск, с. 203-221 (1982).
4. Г.Н.Жижин, М.А.Москалева, Е.И.Фирсов, Е.В.Шомина, В.А.Яковлев. Поглощение поверхностных электромагнитных волн тонкими пленками окислов на поверхности металлов. ЖЭТФ, 79, № 2, с. 561-574 (1980).
5. G.N.Zhizhin, Kh.E.Sterin. Vibrational spectroscopic investigations of the cyclohexane derivatives. «Vibrational spectra and structure», Elsevier, v. 9, p. 195-253 (1981).
6. G.N.Zhizhin. The Surface and transition layers studies by means of surface polaritons and plasmons spectroscopy. «Modern problems of surface physics», Bulgarian Acad. of Sci., ISCNP, Varna 80, Sofia (1981), p. 712-725.
7. G.N.Zhizhin, M.A.Moskalova, E.V.Shomina, V.A.Yakovlev. Surface electromagnetic wave propagation on metal surfaces. p. 93-144.
8. E.A.Vinogradov, G.N.Zhizhin, V.I.Yudson. Thermally stimulated emission of surface polaritons. p. 145-186.
9. G.N.Zhizhin, V.A.Yakovlev. Resonance of transition layer excitations with surface polaritons. p. 275-298, in «Surface Polaritons (Electromagnetic waves at surfaces and interfaces), ed. V.M.Agranovich and D.L.Mills, North-Holland Publishing Co. (1982).
10. G.N.Zhizhin, E.A.Vinogradov, M.A.Moskalova, V.A.Yakovlev. Applications of surface polaritons for vibrational spectroscopic studies of thin and very thin films. Appl. Spectrosc. Rev. (USA), v. 18, № 2, p. 171-263 (1982-1983).
11. V.N.Denisov, B.N.Mavrin, V.B.Podobedov. Hyper-Raman scattering by vibrational excitations in crystals, glasses and liquids. Phys. Rev., 151, 1 (1987).
12. Н.И.Багданскис, В.С.Букреев, Г.Н.Жижин, М.Н.Попова. Инфракрасные спектрометры высокого разрешения. «Современные тенденции в технике спектроскопии», «Наука», Новосибирск, 1982, с. 153-211.
13. Г.Н.Жижин, М.Н.Попова. Методы инфракрасной спектроскопии высокого разрешения для исследования атмосферных газов. В сб. «Спектроскопические методы исследования атмосферных газов», Ин-т физики Лит. ССР, Вильнюс, 1983, с. 30-174.
14. A.F.Goncharov, G.N.Zhizhin. Application of Davydov Splitting for studies of crystal properties. «Vibrational Spectra and Structure», v. 13, p. 223-283 (1984).
15. G.N.Zhizhin. Some applications of FT-IR spectroscopy for solid state physics problems. Microchimica Acta, «Recent aspects of Fourier Transform Spectroscopy», Springer-Verlag, v III, (1987), p. 297-307.
16. V.N.Denisov, B.N.Mavrin, V.B.Podobedov. Raman spectroscopy of the high temperature superconducting  $YBa_2Cu_3O_x$  single crystals and films. Phys. Rep., 194, 397 (1990).
17. G.N.Zhizhin, Yu.N.Krasyukov, E.I.Mukhtarov, V.N.Rogovoi, N.V.Sidorov. Orientational Order-Disorder. Effects in Molecular Crystals as Evidenced by Low-Frequency Raman Spectra. Croatica Chemica Acta, 61, № 3, p. 685-717 (1988).
18. N.I.Agladze, N.Yu.Boldirev, V.M.Burlakov et al. Optical phonons and energy gap spectroscopy in  $YBa_2Cu_3O_x$ . «Recent developments in Molecular Spectroscopy», Blagoevgrad, Bulgaria, 29 aug. — 3 sept, 1988, World Scientific (1989) pp. 279-306.
19. А.А.Балашов, В.А.Вагин, Г.Н.Жижин. Современные фурье-спектрометры — новая ветвь компьютеризированной оптической техники. Компьютерная оптика, вып. 4, 1989, с. 78-89.
20. V.I.Silin, S.A.Voronov, V.A.Yakovlev, G.N.Zhizhin. IR Surface Plasmon (polariton) phase spectroscopy. International Journal of Infrared and Millimeter waves, v. 10, № 1, pp. 101-120 (1989).
21. G.N.Zhizhin, V.A.Yakovlev. Broad band spectroscopy of surface electromagnetic waves. Physics Reports, v. 194, № 5-6, pp. 281-289 (1990).
22. G.N.Zhizhin, A.A.Sigarev, V.A.Yakovlev. FT-IR SEWS of Langmuir-Brodgett films on metal surfaces. J. Molec. Lig., v. 53, pp. 1-14 (1992).
23. V.N.Denisov, B.N.Mavrin, G.Ruani, R.Zamboni, G.N.Zhizhin. Spectroscopic evidence of phase transition in fullerene & Importance of librational (rotational) modes in the superconducting properties of  $M_3C_{60}$ . Proceedings of the First Italian Workshop on fullerenes: Status and Perspectives. World Scientific, 1992, pp. 65-74.

## Литература

1. Г.Н.Жижин, Х.Е.Стерин. Спектры ИК поглощения циклогексана и его симметрично-замещенных при низких температурах. Оптика и спектроскопия, 19, 55-64 (1965).
2. Г.Н.Жижин, Ю.Е.Лозовик, М.А.Москалева, А.Усманов. Спектроскопические проявления фазовых переходов в кристаллическом циклопентане. ДАН СССР, физика, 190, 301-304 (1970).
3. Г.Н.Жижин. Спектроскопия низкотемпературных кристаллографических фаз органических веществ. Кристаллография, 18, № 4, 769-778 (1973).
4. Г.В.Абдуллаев, К.Р.Аллахвердиев, Е.А.Виноградов, Г.Н.Жижин, Н.Н.Мельник, Р.Х.Нани, Э.Ю.Салаев, Р.И.Сардарлы. О возможности фазового перехода в  $TlGaSe_2$ . ДАН Азерб. ССР, 33, 26-30 (1970).
5. Г.В.Абдуллаев, К.П.Аллахвердиев, В.М.Бурлаков, Е.А.Виноградов, Г.Н.Жижин, Н.Н.Мельник, М.Н.Попова, Э.Ю.Салаев, Р.М.Сардарлы. Исследование спектра колебаний кристаллической решетки  $TlGaSe_2$  вблизи точки фазового перехода. ДАН Азерб. ССР, 35, 30-35 (1979).
6. Г.Н.Жижин, В.Н.Роговой. Фоновый спектр кристаллического циклогексана и его особенности в окрестности фазового перехода. ФТТ, 17, № 2, 376-380 (1975).
7. Н.И.Афанасьева, В.М.Бурлаков, Г.Н.Жижин. Фоновый спектр в окрестности фазового перехода кристалл-немагнитический жидкий кристалл и параметр порядка. Письма в ЖЭТФ, 23, № 9, 508-509 (1976).
8. Г.Н.Жижин, Ю.К.Красюков, Э.И.Мухтаров, В.Н.Роговой. Анизотропия вращательных переориентаций циклогексана вблизи фазового перехода. Письма в ЖЭТФ, 28, № 7, 465-468 (1978).
9. Е.А.Виноградов, Г.Н.Жижин. Излучение кристаллической решеткой циклогексана на частоте  $55\text{ см}^{-1}$  при фазовом переходе. Физика твердого тела, 18, № 9, 2826-2827 (1976).
10. Г.Н.Жижин, Н.И.Багданкис. Наблюдение размытого фазового перехода в кристаллическом фенантрене по ИК спектрам. Оптика и спектроскопия, 34, № 6, 1120-1152 (1973).
11. В.М.Бурлаков, Е.А.Виноградов, Ш.Нуров, Н.М.Гасанлы, Я.Г.Исмаилов. Параметры полос колебательного спектра в области температур фазовых переходов. ФТТ, 27, № 11, с. 3365-3368 (1985). Soviet Physics Solid State, 27, p. 2025-2027 (1985).
12. А.А.Аникеев, В.М.Бурлаков, М.Р.Яхьяев. Аномальное поведение формы фоновых линий КР в слоистых сегнетоэлектриках. ФТТ, 32, № 6, с. 2131-2133 (1990). Soviet Physics Solid State, 32, p. 1237-1238 (1990).
13. 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).
14. Г.Н.Жижин, М.Н.Попова. О применении фурье-спектрометра для регистрации комбинационного рассеяния света. Препринт ИСАН, № 10, (1979).
15. N.I.Agladze, A.A.Balashov, V.S.Burkeev, N.G.Kultepin, M.N.Popova, V.A.Vaglin, E.A.Vinogradov, G.N.Zhizhin. New high resolution infrared Fourier transform spectrometer and the first results in atomic, molecular and crystal spectroscopy, Proc. SPTI Int. Soc. Opt. Eng. (USA), vol. 553, p. 452-3 (1985).
16. N.I.Agladze, M.N.Popova. Hyperfine structure in optical spectra of  $LiYF_4:Ho$ , Solid State Communication, v. 55, № 12, p. 1097-1100 (1985).
17. N.I.Agladze, M.N.Popova, G.N.Zhizhin, V.I.Egorov, M.A.Petrova. Isotope structure in optical spectra of  $LiYF_4:Ho^{3+}$ . Phys. Rev. Lett., v.66, № 4, p. 477-480 (1991).
18. N.I.Agladze, G.G.Chepurko, M.N.Popova, E.P.Hlybov. Magnetic ordering on  $Y_2BaCuO_5$ . Phys. Lett. A., v. 133, № 4/5, p. 260-262 (1988).
19. 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, № 2, 171-262 (1982-83).
20. Г.Н.Жижин, М.А.Москалева, О.И.Капуста, В.Г.Назин, В.А.Яковлев. Отражение и поверхностные поляритоны — кварца в присутствии тонкой металлической пленки. ФТТ, Т. 17, № 7, с. 2008-2012 (1975).
21. V.M.Agranovich, A.G.Malshukov. Surface polariton spectra if the resonance with the transition layer vibrations exist. Optics Communications, v. 11, p. 169 (1974).
22. Г.Н. Жижин, М.А.Москалева, В.Г.Назин, В.А.Яковлев. Резонанс поверхностного поляритона подложки с продольным фононом тонкой пленки фтористого лития. ЖЭТФ, Т. 78, № 2, с. 687-691 (1977).
23. Е.А.Виноградов, Г.Н.Жижин. Термостимулированное излучение поверхностными колебаниями атомов кристаллической решетки селенида цинка. Письма в ЖЭТФ, 24, № 2, 84-86 (1976).
24. E.A.Vinogradov, G.N.Zhizhin, A.G.Mal'shukov, V.I.Yudson. Thermostimulated polariton emission of zinc selenide films on a metal support. Solid State Comm., 23, 915-921 (1977).
25. Е.А.Виноградов, Г.Н.Жижин, И.И.Хаммадов, В.А.Яковлев. Термостимулированное излучение поверхностных поляритонов молибдата гадолиния в окрестности фазового перехода. ФТТ, 23, № 2, 580-581 (1981).
26. Г.Н.Жижин, М.А.Москалева, Е.В.Шомина, В.А.Яковлев. Селективное поглощение поверхностной электромагнитной волны, распространяющейся по металлу в присутствии тонкой диэлектрической пленки. Письма в ЖЭТФ, т. 24, № 4, с. 221-225 (1976).
27. Г.Н.Жижин, М.А.Москалева, Е.В.Шомина, В.А.Яковлев. Краевые эффекты при распространении поверхностных электромагнитных волн ИК диапазона вдоль поверхности металла. Письма в ЖЭТФ, т. 29, № 9, с. 533-536 (1979).
28. В.А.Яковлев, В.А.Сычугов, А.А.Хакимов. Интерференционные явления при срыве ПЭВ с края металлической подложки. Квантовая электроника, т. 10, № 3, с. 611-612 (1983).
29. Г.Н.Жижин, Н.В.Крайская, Ф.А.Уваров, В.А.Яковлев. Распространение поверхностных электромагнитных волн по керамике ФТТ, т. 30, № 3, с. 929-931 (1988).
30. Г.Н.Жижин, В.Л.Масленников, В.И.Силин, В.А.Сычугов, В.А.Яковлев. Моды Ценнека-Зоммерфельда на поверхности кристаллического кварца. ФТТ, т. 27, № 1, с. 198-200 (1985).
31. G.N.Zhizhin, M.A.Moskalova, A.A.Sigarev, V.A.Yakovlev. FTIR surface electromagnetic waves (SEW) absorption spectroscopy of very thin films on metal. Opt. Comm., v. 43, № 1, 31-36 (1982).
32. E.V.Alieva, V.A.Yakovlev, V.I.Sinin, A.Volkov. Surface electromagnetic wave excitation from infrared to visible. Opt. Comm., v. 96, p. 218-220 (1993).
33. L.A.Kuzik, Yu.Ye.Petrov, V.A.Yakovlev, G.N.Zhizhin, F.A.Pudonin. Optical and electrical properties of superthin niobium films deposited on crystalline quartz. Phys. Lett. A, v. 171, p. 418-420, (1992).
34. Б.Н.Маврин, Х.Е.Стерин. Ферми-резонанс поляритона с бифоном в кристалле  $LiNbO_3$ . Письма в ЖЭТФ, 16, 265 (1972).
35. 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).
36. В.Н.Денисов, Б.Н.Маврин, В.Б.Подобедов, Х.Е.Стерин. Гиперкомбинационное рассеяние на поляритах в плавленом кварце. Письма в ЖЭТФ, 32, 340 (1980).
37. В.Н.Денисов, Б.Н.Маврин, В.Б.Подобедов, Х.Е.Стерин. Гиперкомбинационное рассеяние на поляритах в жидком четыреххлористом углероде. Письма в ЖЭТФ, 35, 312 (1982).
38. В.Н.Денисов, Б.Н.Маврин, В.Б.Подобедов, Г.Г.Скороцкая. Кинетика фотокристаллизации и КР в аморфном объемном полупроводнике GaSb. Письма в ЖЭТФ, 50, 363 (1989).
39. А.Н.Гасс, О.И.Капуста, С.А.Климин. Аномальный изотропический эффект в адсорбционных комплексах метана и дейтерометана на холодноосажденных пленках серебра. Поверхность, 12, 133 (1991).
40. 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).
41. В.Н.Денисов, Б.Н.Маврин, В.Б.Подобедов, Х.Е.Стерин. Гиперкомбинационное рассеяние и правила отбора по волновому вектору и матричному элементу в колебательных спектрах стекол и жидкости. ЖЭТФ, 84, 1266 (1983).
42. V.N.Denisov, B.N.Mavrin, V.B.Podobedov. Raman spectroscopy of the high temperature superconducting  $YBa_2Cu_3O_x$  single crystals and films. Phys.Rep., 194, 397 (1990).
43. В.Н.Денисов, Б.Н.Маврин, Ж.Руани, Р.Замбони, К.Талиани. Резонансное и пререзонансное КР в пленках  $C_60$  и  $K_6C_60$ . ЖЭТФ, 102, 300 (1992).

## ЛАБОРАТОРИЯ СПЕКТРОСКОПИИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР

Лаборатория спектроскопии полупроводниковых структур создана в апреле 1990 года (заведующий лабораторией профессор Е.А.Виноградов). Лаборатория фактически выделилась из отдела спектроскопии твердого тела (группа к.ф.-м.н. В.М. Бурлакова, работавшая ранее вместе с Е.А.Виноградовым), к ней присоединилась группа из трех человек из лаборатории спектроскопии ультрабыстрых процессов (д.ф.-м.н. Д.Н. Никогосян) специально для исследования кинетики электронных возбуждений в сверхрешетках и в 1990 — 1991 году научный персонал лаборатории увеличился за счет прихода четырех молодых специалистов.

Основные достижения сотрудников лаборатории основаны на результатах, полученных ими ранее в отделе спектроскопии твердого тела и отделе лазерной спектроскопии.

Экспериментально методами спектроскопии термостимулированного ИК излучения (Е.А.Виноградов и Г.Н.Жижин) и теоретически (к.ф.-м.н. Т.А.Лескова, д.ф.-м.н. В.И.Юдсон и д.ф.-м.н. А.Г.Мальшуков, теор. отдел ИСАН) изучены собственные состояния электромагнитного поля (колебательные поляритоны и плазмо-поляритоны) в тонкопленочных структурах типа «вакуум — пленка полупроводника — металлическая подложка» и «призма НПВО — вакуумный зазор — пленка полупроводника — металл» [1].

Показано, что поляритоны многослойных структур являются смешанными электромагнитными возбуждениями всей структуры в целом и что оптические свойства структуры определяются эффектами размерного квантования электромагнитного поля всех элементарных дипольно-активных возбуждений в многослойной структуре на границах структуры (взаимодействием «мод полости» с элементарными дипольными возбуждениями в «полости»).

Обнаружены эффекты сильных резонансных взаимодействий между «модами полости» и дипольными колебаниями примесных атомов в «полости», а также с интерфейсными плазмонами, за счет которых интегральное поглощение соответствующими состояниями возрастает более чем в  $10^5$  раз [2]. Обнаружены эффекты взаимодействия между возбуждениями в граничащих средах.

Показано также, что в многослойных структурах некоторые нерадиационные колебательные возбуждения с волновым вектором большим волнового вектора света в вакууме преобразуются в радиационные состояния за счет эффектов размерного квантования электромагнитного поля границами структуры и эффектов взаимодействия полей. Так экспериментально наблюдалось термостимулированное свечение нерадиационных поверхностных поляритонов кристаллов полупроводников, металлов и полупроводниковых пленок на металлических подложках при наличии призмы НПВО над объектом [3, 4].

Разработаны методики исследования спектров термостимулированного ИК излучения поляритонов кристаллов и пленок (Е.А.Виноградов, н.с. Н.Ю.Болдырев) и создан пакет программ расчета на ПЭВМ спектров поглощения (отражения) и дисперсии поляритонов тонкопленочных структур, в том числе и в режиме НПВО (к.ф.-м.н. С.А.Киселев, н.с. А.П.Рябов).

В группе В.М.Бурлакова ведутся исследования фононных спектров сегнетоэлектриков - полупроводников и высокотемпературных сверхпроводников в широком интервале температур, включая точки фазовых переходов. Изучены проявления пространственной неоднородности параметра порядка в колебательных спектрах слоистых сегнетоэлектриков семейства  $TiGaSe_2$ . Обнаружено изменение формы контура ряда спектральных полос с лоренцевой до гауссовой в окрестности точки фазового перехода, связанных с рассеянием колебательных возбуждений на квазистатистических флуктуациях параметра порядка [5, 6].

Экспериментально обнаружен эффект стабилизации сегнетофазы вблизи поверхности слоистого сегнетоэлектрика [7].

Выявлены резонансы Фано инфракрасных фононов с электронными возбуждениями в соединениях семейства ВТСП, оценена константа электрон-фононного взаимодействия [8].

Методом молекулярной динамики исследованы солитоноподобные возбуждения в одно- и двумерных ангармонических решетках, обнаружена модуляционная неустойчивость однородного возбуждения ангармонической решетки [9].

В группе с.н.с. к.ф.-м.н. А.В.Заяца совместно с отделением физики твердого тела ФИАН ведутся исследования физических свойств сверхрешеток на основе ультратонких ( $\sim 1$  нм) слоев аморфного кремния и двуокиси кремния. По спектрам фотолюминесценции и спектрам возбуждения фотолюминесценции (совместно с 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 — лаб. колебательной спектроскопии конденсированных сред) и из спектров  $\lambda$ -модуляционного поглощения определена структура электронных уровней размерного квантования в сверхрешетках [10]. Показано, что короткопериодические сверхрешетки обладают строго двумерной структурой размерно-квантованных подзон 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 в барьерных слоях кварца [11, 12].

Для исследования фотолюминесценции сверхрешеток создан и успешно применяется

параметрический генератор пикосекундных импульсов на основе кристаллов DKDP и  $\text{LiIO}_3$ . За счет генерации разностной частоты в кристалле GaSe предполагается осуществить смещение частоты параметрического генератора света в среднюю ИК область спектра (Д.Н.Никогосян, к.ф.-м.н. М.Г.Новиков, Ю.А.Репеев).

Группа Д.Н.Никогосяна на протяжении ряда лет проводит исследования механизмов взаимодействия высокоинтенсивного лазерного УФ излучения с биомолекулами — компонентами живой клетки, а также с некоторыми вирусами и бактериями (совместно с НИИ физики СПбГУ, ИМБ РАН, ИБХ РАН, МГУ и др.). В 1980 году открыт двухфотонный лазерный фотолиз жидкой воды [13]. Изучены фотофизические и фотохимические свойства ДНК и РНК и их компонентов, а также белков и аминокислот под действием лазерного УФ облучения. Впервые определен ряд важнейших спектрально-кинетических и фотохимических констант. Проведены эксперименты по лазерной фотохимии индуцируемой циркулярно-поляризованным светом. Обнаружен эффект значительного увеличения кругового дихроизма (на 2-3 порядка) при электронном возбуждении хиральной молекулы циркулярно-поляризованным лазерным импульсом. Обнаружен разрыв пептидной связи под действием лазерного УФ излучения. Проведено исследование влияния фотоповреждений вторичной структуры ДНК на эффективность образования жидкокристаллических дисперсий (с целью создания биосенсоров) [14, 15].

В той же группе совместно с НИИ «Полюс» проводятся теоретические и экспериментальные исследования по прикладной нелинейной оптике. Произведен расчет коэффициентов эффективной нелинейности для двухосных кристаллов класса  $\text{mm}2$  в общем случае несоответствия кристаллографических и кристаллофизических координатных систем [16].

В ближайшем будущем планируется продолжить исследования линейных и нелинейных оптических свойств кристаллов и пленок в ИК области спектра, а также провести исследования корреляционных функций флуктуаций поляритонов в кристаллах и многослойных структурах, в том числе и в окрестности структурных фазовых переходов в кристаллах. Для этих целей в настоящее время ведется разработка новых типов приборов:

— спектрокоррелометра на базе тандема из двух последовательно соединенных фурье-спектрометров (В.М.Бурлаков и н.с. Н.Ю.Болдырев);

— криогенного фурье-спектрометра (спектрорадиометра), в котором все оптические элементы и корпус прибора будут поддерживаться при температуре криоагента — жидкого азота или гелия (Е.А.Виноградов, н.с. И.В.Федоров и Н.Ю.Болдырев).

1. 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).
2. E.A. Vinogradov, «Vibrational Polaritons in Semiconductor Films on Metal Surfaces», Physics Reports, 217, No. 4, p.159—223, 1992.
3. E.A.Vinogradov, G.N.Zhizhin, «Thermally Stimulated Emission by Surface Oscillations of a Zinc Selenide Crystal-Lattice Atoms», Soviet Physics JETP Letters, 24, No.2, p.71—73, 1976.
4. Е.А.Виноградов, И.И.Хаммадов. «Спектроскопия объемных и поверхностных фононов кристаллов», Издательство «ФАН», Ташкент, 166 с., 1989.
5. В.М.Бурлаков, Е.А.Виноградов, Ш.Нуров, Н.М.Гасанлы, «Параметры полос колебательного спектра  $\text{TlInS}_2$  в области температур фазовых переходов». ФТТ, 27, No.11, с.3365-3368, 1985. Soviet Physics Solid State, 27, p.2025-2027, 1985.
6. А.А.Аникьев, В.М.Бурлаков, М.Р.Яхьяев, «Аномальное поведение формы фононных линий КР в слоистых сегнетоэлектриках». ФТТ, 32, No.7, с.2131-2133, 1990. Soviet Physics Solid State, 32, p.1237-1238, 1990.
7. 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.
8. V.M.Burlakov, S.V.Shulga, J.Keller, K.F.Renk, «Evidence for a Fano-type interaction of infrared active phonons with electron excitations in  $\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ . Physica C, 190, p.304-308, 1992.
9. V.M.Burlakov, S.A.Kiselev, V.N.Pyrkov, «Computer simulations of intrinsic localised modes in one- and two-dimensional anharmonic lattices». Phys.Rev.B, 42, p.4921-4927, 1990.
10. E.A.Vinogradov, V.N.Denisov, A.V.Zayats, B.N.Mavrin, G.I.Makarov, S.R.Oktyabrskii, 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.
11. A.V.Zayats, Yu.A.Repeev, D.N.Nikogosyan, E.A.Vinogradov, «Radiative recombination in short-period a - Si/SiO<sub>2</sub> superlattices». Journal of Luminescence, 52, p.335 — 343, 1992.
12. A.V.Zayats, Yu.A.Repeev, D.N.Nikogosyan, E.A.Vinogradov, «Two Types of Hot Luminescence in Si/SiO<sub>2</sub> Superlattices». Physics Letters, A155, No.1, p.65—68, 1991.
13. D.N.Nikogosyan, A.A.Orăevsky, V.I.Rupasov, «Two-photon ionization and dissociation of liquid water by powerful laser UV irradiation». Chem.Phys., 77, No.1, p.131-143, 1983.
14. D. N. Nikogosyan, «Two-quantum UV photochemistry of nucleic acids: comparison with conventional low-intensity UV photochemistry and radiation chemistry». Int. J. Radiat. Biol., 57, No.2, p.233-299, 1990.
15. D. N. Nikogosyan, Yu. A. Repeev, E. V. Khoroshilova, I. V. Kryukov, E. V. Khoroshilov, A. V. Sharkov, «Asymmetric photolysis of biomolecules under high-intensity UV laser irradiation». Chem.Phys., 147, No.2/3, p.437-445, 1990.
16. V.G.Dmitriev, G.G.Gursadyan, D.N.Nikogosyan, Handbook of Nonlinear Optical Crystals. Springer Series in Optical Sciences, 64, ed. by A.E.Siegman (Springer-Verlag: Berlin, Heidelberg, New York) p.1-221, 1991.

# ТЕМАТИЧЕСКАЯ ГРУППА МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Группа математического моделирования физических процессов была создана в 1985 году. С тех пор ее возглавляет ведущий научный сотрудник, к.ф.-м.н. Ю.Е.Лозовик. В группе работают три постоянных сотрудника, несколько аспирантов, стажеры и студенты.

Работа ведется по ряду направлений спектроскопии твердого тела, кластеров и кластерных материалов, сверхпроводимости, нанофизики, исследуются фундаментальные вопросы атомной физики. Принципом работы Группы является сочетание аналитических расчетов с использованием возможностей современного теоретического аппарата и математического моделирования методами молекулярной динамики, Монте-Карло, квантового Монте-Карло. Моделирование используется для изучения 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, могут использоваться для проверки теоретических моделей и поиска оптимальных параметров для планирования физических экспериментов.

Сотрудниками Группы написано около 180 научных работ (в том числе несколько обзоров, коллективная монография), защищено в общей сложности 15 кандидатских диссертаций (рук. Ю.Е.Лозовик).

Ниже кратко описаны некоторые из полученных результатов.

## **Спектроскопия кристаллов: теория и моделирование спектров и фазовых переходов**

К фундаментальным задачам физики твердого тела относятся анализ механизмов плавления, предсказание из первых принципов точек плавления, температурной зависимости спектров и объяснение существования почти универсальных характеристик для тел различной природы (типа параметра плавления Линдемана и пр.).

В работах [1] 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 квантового параметра, связанного с плотностью. Смягчение спектра сначала линейно, потом происходит 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 [1, 2] и обоснован эмпирический критерий плавления (типа параметра) Линдемана (к двумерии обычный критерий Линдемана неприменим, т.к. среднеквадратичное смещение частицы из узла расходится).

В рамках развитого подхода может найти разрешение загадка о природе плавления двумерных кристаллов. Электронные кристаллы должны плавиться согласно теории топологического плавления путем диссоциации дислокационных пар. При этом температура перехода определяется перенормированным ангармонизмом [1] модулем сдвига. У кристаллов с более жестким потенциалом взаимодействия еще раньше происходит срыв устойчивости из-за фононных ангармонизмов, и плавление происходит как фазовый переход I рода.

Действительно, физические эксперименты для электронных (для электронов над He и в электронных слоях в полупроводниках) кристаллов свидетельствуют в пользу топологического плавления. Для адсорбированных атомов ситуация менее ясная, т.к. на результаты сильно влияет наличие дефектов подложки, примесей и т.п. Поэтому методами математического моделирования (молекулярной динамики, Монте-Карло) изучена природа плавления и спектры двумерных кристаллов с различными потенциалами взаимодействия между частицами [2]. Доказано, что плавление в 2D кристаллах с потенциалом взаимодействия более жестким, чем кулоновский, как и предсказывает вышеупомянутая теория, происходит как фазовый переход I рода. Вместе с тем для 2D-вигнеровского кристалла [2] плавление, как предсказывает теория, происходит как два непрерывных (топологических) перехода — сначала происходит диссоциация дислокационных пар и теряется трансляционный порядок. При более высокой температуре происходит диссоциация пар дисклинаций и ориентационно упорядоченная фаза (гексатик) переходит в изотропную жидкость.

Методами математического моделирования подробно изучена ангармоническая структура спектров. Результаты моделирования свидетельствуют о том, что с ростом температуры происходит смягчение поперечных и ужесточение продольных фононов.

## Нанозифика. Кластеры, малые частицы, квантовые точки

На лазерно-охлажденные ионы, либо электроны в ловушках Пеннинга или в радиочастотной ловушке Поля действует эффективный потенциал, который можно считать гармоническим. Аналогичным потенциалом можно охарактеризовать и электроны в квантовых точках в полупроводниках. Любопытно, что полная потенциальная энергия такой модели с учетом взаимодействия зарядов формально совпадает с одноименной величиной в модели атома Томсона, ранней модели атома, согласно которой электроны плавают в бесструктурном положительном фоне «как изюм в пудинге». Указанные системы являются физической реализацией атома Томсона [3]. Кулоновские кластеры, как показывает моделирование, обладают в классическом режиме оболочечной кристаллической структурой. С помощью моделирования построен аналог периодической таблицы элементов для двумерного и трехмерного атомов Томсона [3]. С ростом температуры в кластерах происходят фазовые переходы. Так, в 2D кластере сначала происходит ориентационное плавление (одна из оболочек, оставаясь кристаллической, испытывает «заторможенное вращение»), затем теряется кристаллический порядок в оболочках и, наконец, исчезает оболочечная структура [4]. Эти переходы сопровождаются резким изменением в спектре системы. С помощью моделирования интегралов по траектории рассчитано и квантовое («холодное») плавление электронного кластера при изменении параметров ловушки [5]. Для расчета квантово-механических кулоновских кластеров был использован также вариационный расчет, сводящийся к расчету классической статистической суммы, а также непертурбативный метод — разложение по обратной размерности пространства. Проанализирована перестройка спектра при изменении параметров системы [6].

Предсказан аномальный магнетизм 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. С помощью моделирования изучено каналирование атомов в световых полях (оно может быть использовано в нанотехнологии).

## Вещество в сильных магнитных полях

В широком диапазоне магнитных полей (МП) изучены спектры, силы осцилляторов и иные характеристики мало- и многоэлектронных атомов и ионов, двухатомных молекул. Предсказана инициированная МП диссоциация и перестройка основного состояния биэкситона.

Предсказана и подробно изучена инициированная МП кристаллизация двумерной (2D) системы электронов в полупроводниках и влияние на нее сил изображения. Показано, что основное состояние 2D системы взаимодействующих электронов и дырок в сильных МП при любой плотности является идеальным газом небозевских экситонов [7].

Предсказан дрейфовый резонанс в 2D системе электронов в сильных МП, связанный с резонансным возбуждением дрейфовых граничных токов

вдоль внутренних и внешних границ системы [8].

## Спектры возбуждения в неоднородных и неупорядоченных системах

Проанализированы спектры плазмонов, локализованных вблизи примесей, вблизи различных неоднородностей, рассчитано комбинационное рассеяние света на локализованных плазмонах, а также их затухание [9]. Рассмотрена локализация экситонов Ванье-Мотта в неупорядоченных полупроводниках. Предсказана зависимость формы линии экситонного поглощения от типа разупорядоченности. Предсказано аномальное подавление рассеяния электромагнитных волн от системы частиц с магнитным покрытием.

## Электронные спектры сверхпроводников и полупроводников

Рассчитан электромагнитный отклик сверхпроводников (СП) при произвольном соотношении между длиной когерентности и лондоновской глубиной проникновения поля. Развита теория для переходов валентная зона — зона проводимости в сверхпроводниках, проанализировано проявление СП щели в этом переходе [10]. Теория подтверждена с помощью фемтосекундной лазерной спектроскопии. Изучены СП фазовые переходы гранулированных систем (роль квантовых флуктуаций, влияние неупорядоченности). Рассмотрен СП фазовый переход в слоистых системах, влияние неупорядоченности на кинетику квазичастиц в СП, возможность локализации и т.п. Проанализированы оптические свойства ВТСП. Рассчитаны экситоны, биэкситоны в слоистых системах, их переход в экситонную фазу, аномальные кинетические свойства.

## Некоторые фундаментальные вопросы и методы расчета

Развит метод расчета многочастичных систем, основанный на разложении по обратной размерности пространства. Расчет позволяет получить в приближенной аналитической форме условие образования кластера из нескольких частиц и его спектр. Рассмотрен механизм конфайнмента частиц, связанный с локализацией Андерсона в поле неупорядоченного потенциала взаимодействия между ними. Рассмотрено управление лэмбовским сдвигом атома в резонаторе. Проанализировано уравнение состояния анион-квазичастиц с дробной статистикой.

## Литература

1. Yu.E. Lozovik, V.M. Farztdinov Sol.St. Commun. 54(B), 725 (1985); Phys.Lett. A112(1/2), 61 (1985); ФТТ 27 (8) 6 2435; (10) 3124 (1985); Physica, 1993.
2. В.М. Беданов, Г.В. Гадияк, Ю.Е. Лозовик ЖЭТФ 88(5), 1622 (1985); Phys.Lett. A109(6), 289; A108(9), 448 (1985); Ю.Е. Лозовик «Математическое моделирование», 1993.
3. Ю.Е. Лозовик УФН 153, 356 (1987).
4. Yu.E. Lozovik, V.A. Mandelshtam Phys.Lett.A 145, 269, 1990.
4. Yu.E. Lozovik, V.A. Mandelshtam Phys.Lett.A 145, 469, 1992.
6. A.A. Belov, Yu.E. Lozovik, A. Gonzalez Phys.Lett. A142(6/7), 389 (1989).
7. Ya.M. Blanter, Yu.E. Lozovik, Physica B182, 254, (1992).
8. A.B. Dzyubenko, Yu.E. Lozovik, J. Phys. A24, 415, (1991).
9. Yu.E. Lozovik, A.V. Klyuchnik in «Dielectric Function of Condensed Systems», eds L.V. Keldysh et al. Elsevier, 1987, p.299-387.
10. A.L. Dobryakov et al, Phys. Rev. B47, 11515, (1993).
11. A.A. Belov, Yu.E. Lozovik, J. Phys. B22, L101, (1989).

## 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. лабораторией к.ф.-м.н. Р.В.Амбарцумян). 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.Матвеев), которая удачно расширила круг исследуемых научных проектов и позволила создать полноценный отдел лазерной спектроскопии, который достиг численности около 50 человек уже к 1985 г. Отдел представляет собой единый коллектив тесно связанных друг с другом и объединенных общими целями научных сотрудников и специалистов.

### Лаборатория лазерной спектроскопии

Лаборатория лазерной спектроскопии была создана летом 1970 г. и ее первым заведующим с момента организации и по настоящее время является д.ф.-м.н. В.С.Летохов. Первыми научными сотрудниками лаборатории были О.Н.Компанец и О.А.Туманов, которые перешли в Институт из ФИАН 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 коле-

бательно-вращательных переходов молекул (О.А.Туманов, А.Л.Голгер, 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. 11), 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 фотонных пучков и т.д.

На рис. 12 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) [7]. 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

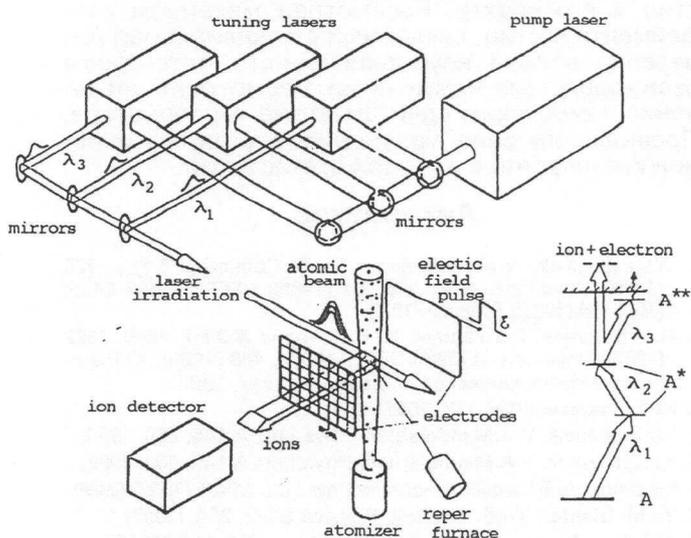


Рис. 11

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

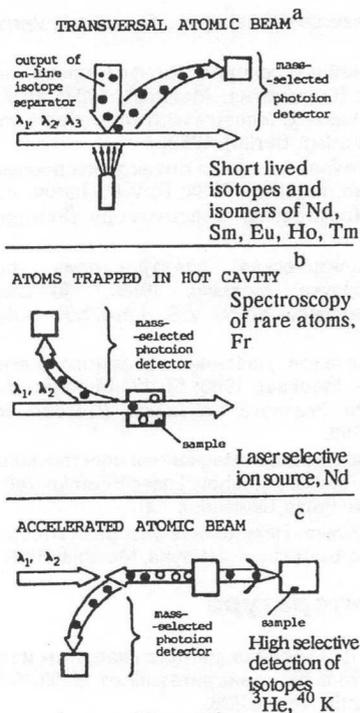


Рис. 12

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

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. 13 показаны результаты первого эксперимента по лазерному детектированию атома  $^3\text{He}$  [8].

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 ускорителе Ленинградского Института ядерной физики АН (ЛИЯФ) и Европейского Центра ядерных исследований (ЦЕРН). В ходе этих экспериментов было впервые осуществлено оптическое разделе-

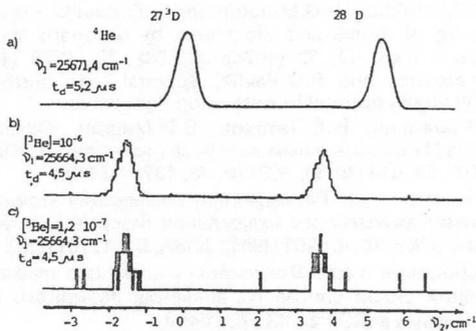


Рис. 13

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.

детектированию благородных элементов и элементов платиновой группы в океане [5a] и, совместно с ГЕОХИ АН СССР обнаружению родиевой аномалии на границе третичного и четвертичного периодов (65 млн. лет тому назад) [5b], эксперименте [6] по измерению ридберговских состояний и потенциала ионизации атома Fr в образце, содержащем всего  $10^5$  его атомов.

Метод резонансной ионизации в сочетании с идеей электростатического ускорения атомов (в виде ионов) в пучке был предложен [7] и успешно использован (группа

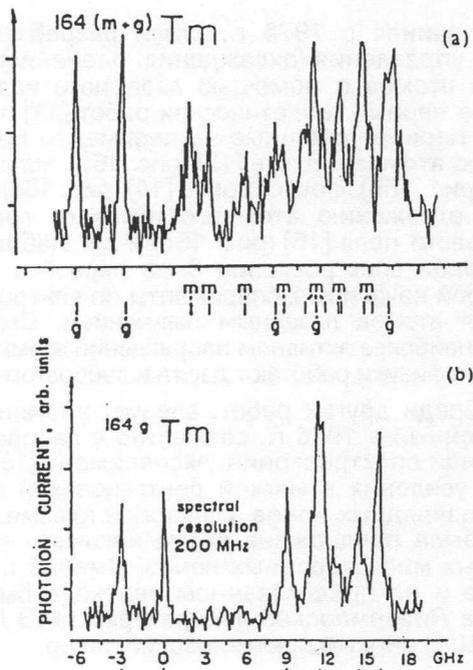


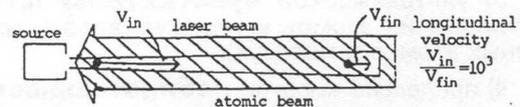
Рис. 14

Спектр резонансной фотоионизации (переход  $4f^{13}6s^27F_{7/2} - 4f^25d6s^2(67/2)_7$  на 589,6 нм) изотопа  $^{164}\text{Tm}$  в а) основном и изомерном состоянии ядра; б) основном состоянии ядра.

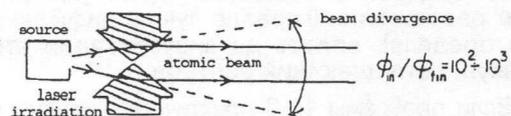
ние ядерных изомеров. На рис. 14 показаны результаты такого эксперимента [9] с изомерными ядрами  $^{141}\text{Sm}$  и  $^{164}\text{Tm}$ .

В 1977 г. был впервые осуществлен эксперимент (В.И.Балыкин и др.) по лазерному флуоресцентному детектированию единичных атомов (Na) [10a], который лег в основу широко используемого сегодня метода флуоресцентных вспышек [10б] для детектирования одиночных атомов, в частности, в ядерно-физических экспериментах.

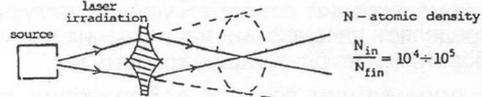
LONGITUDINAL MODERATION



COLLIMATION



FOCUSING



MIRROR REFLECTION

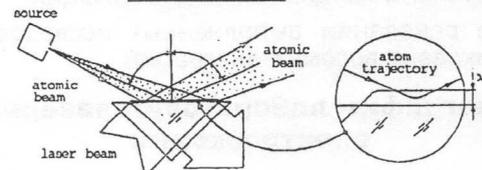


Рис. 15

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

Начиная с 1976 г., стали разрабатываться идеи управления (охлаждения, пленения) движением атомов с помощью лазерного излучения. После первых теоретических работ [11] последовали первые успешные эксперименты по замедлению атомов в пучке [12] (рис. 15а), коллимации [13] (рис. 15б), фокусировке [14] (рис. 15с) и наконец, отражению атомного пучка от градиента светового поля [15] (рис. 15д) и др. 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 работ, следует упомянуть выполненный в 1976 г., совместно с лабораторией атомной спектроскопии, эксперимент [16] по поиску усиления в мягкой рентгеновской области многозарядных ионов в лазерной плазме, в которой была предложена схема накачки неоноподобных 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, 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 23 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);

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 диффракционного предела), вплоть до визуализации атомов, молекул, поглощающих центров.

Если проблемы 1—3 практически решены и уже происходит очень успешная эксплуатация разработанных методов, то проблемы 4—5 находятся в стадии поиска и демонстрации соответствующих методов. Это предопределяет дальнейшие направления исследований лаборатории на ближайшие три-пять лет.

За прошедшие годы, в лаборатории подготовлена и защищена одна докторская, примерно двадцать пять кандидатских диссертаций.

На основании выполненных исследований опубликовано восемь 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 фотопроцессы в атомах и молекулах (Физматгиз, Москва), 1983; б) V.S. Letokhov. Nonlinear Laser Chemistry with Multiple-Photon Excitation (Springer-Verlag, Berlin), 1983.
4. а) В.П.Жаров, В.С.Летохов. Лазерная оптико-акустическая спектроскопия (Наука, Москва), 1984; б) V.P.Zharov, V.S. Letokhov. Laser Optoacoustical Spectroscopy (Springer-Verlag, Berlin), 1986.
5. а) Лазерная аналитическая спектроскопия, под ред. В.С.Летохова (Наука, Москва), 1986. б) Laser Analytical Spectrochemistry, ed. by V.S. Letokhov (Adam Hilger, Bristol), 1986.
6. а) В.Г.Миногин, В.С.Летохов. Давление лазерного излучения на атомы (Наука, Москва), 1986; б) V.G.Minogin, V.S. Letokhov. Laser Light Pressure on Atoms (Gordon and Breach, New York), 1986.
7. а) В.С.Летохов. Лазерная фотоионизационная спектроскопия (Наука, Москва), 1987. б) V.S. Letokhov. Laser Photoionization Spectroscopy (Academic Press, Orlando), 1987.
8. В.С.Летохов и В.П.Чеботаев. Нелинейная лазерная спектроскопия сверхвысокого разрешения (Наука, Москва), 1990.

### Литература

- [1] В.С.Летохов. Способ фотоионизации газа лазерным излучением. Авт.свид. N 784679 с приоритетом от 30.03.1970. Бюлл. изобретений, 1982, N 8, 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.Ambartsumian and V.S.Letokhov. Selective Two-Step (STS) Photoionization of Atoms and Photodissociation of Molecules by Laser Radiation. Appl.Optics, 11, N 2, 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 (1978).
- [5] G.I.Bekov, V.S.Letokhov et al. a) Ruthenium in the Ocean. Nature, 312, 748 (1984); б) Rhodium distribution at the Cretaceous/Tertiary boundary analyzed by ultrasensitive laser photoionization. Nature, 332, 146 (1988).
- [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] 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).
- [8] S.A.Aseyev, Yu.A.Kudriavtsev, V.S. Letokhov and V.V.Petrunin. Laser detection of the rare isotope He at concentrations as low as  $10^{-9}$ . Optics Letters, 16, 514 (1991).
- [9] V.I.Mishin et al. Resonance photoionization spectroscopy and laser separation of  $^{141}\text{Sm}$  and  $^{164}\text{Tm}$  nuclear isomers. Optics Comm. 61, 383 (1987).
- [10] В.И.Балькин 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).
- [11] а) 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); б) V.S.Letokhov and B.D.Pavlik. Spectral line narrowing in gas by atoms trapped in a standing light wave.
- [12] В.И.Балькин, В.С.Летохов, В.И.Мишин. Охлаждение атомов Na резонансным лазерным излучением. Письма в ЖЭТФ, 29, 614 (1979); ЖЭТФ, 78, 1376 (1980).
- [13] В.И.Балькин и др. Радиационная коллимация атомного пучка, путем двухмерного охлаждения лазерным излучением. Письма в ЖЭТФ, 40, 251 (1984); JOSA, B2, 1776 (1985).
- [14] В.И.Балькин и др. Фокусировка атомного пучка диссипативной силой светового давления лазерного излучения. Письма в ЖЭТФ, 43 172 (1986).
- [15] В.И.Балькин и др. Отражение светового пучка от градиента светового поля. Письма в ЖЭТФ, 45, 282 (1987); Phys.Rev.Lett. 60, 2137 (1988).
- [16] А.Н.Жерихин и др. Об усилении в области дальнего вакуумного ультрафиолета на переходах многозарядных ионов. Квант.Электроника, 3, 152 (1976).

## Лаборатория спектроскопии возбужденных состояний молекул

Лаборатория была организована в 1970 г., вначале как сектор, который позднее был преобразован в лабораторию в ее теперешнем виде. 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 (1993 г.) в постоянном штате состоит двенадцать научных сотрудников, кроме того в ней обычно работает несколько студентов и аспирантов. Лаборатория состоит из трех групп (д.ф.-м.н. Г.Н.Макаров, д.ф.-м.н. А.А.Пурецкий, д.ф.-м.н. Е.А.Рябов), в которых ведутся эксперименты по нескольким направлениям спектроскопии возбужденных состояний молекул.

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

Практически одновременно с первым методом начал разрабатываться второй подход, основанный на ИК многофотонной диссоциации молекул (ИК МФД). Эффект изотопической селективности ИК

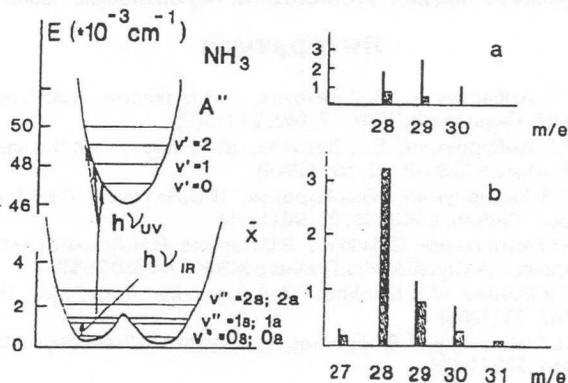


Рис. 16

Слева: схема изотопически-селективной двухступенчатой фотодиссоциации молекул аммиака. Селективно возбужденные ИК лазерным излучением молекулы диссоциируют УФ излучением.

Справа: результаты по лазерному разделению изотопов азота. Масс-спектры  $\text{N}_2$  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).

МФД был впервые продемонстрирован (рис. 17) 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) [2]. Сразу после этого были проведены эксперименты по макроскопическому обогащению изотопов серы (рис. 18) при ИК МФД  $\text{SF}_6$  [3].

После первых успешных демонстраций был проведен большой цикл исследований селективного лазерного возбуждения молекул. Особое внимание было уделено изучению механизма ИК МФД возбуждения молекул, а также причин, определяющих изотопическую селективность этого процесса. Одновременно совместно с рядом организаций велись работы по масштабной реализации разделительного процесса на основе ИК МФД. Все это позволило в конечном итоге разработать и подготовить к внедрению промышленную технологию лазерного разделения изотопов углерода. В настоящее время в рамках этой программы ведется разработка процесса разделения изотопов других элементов.

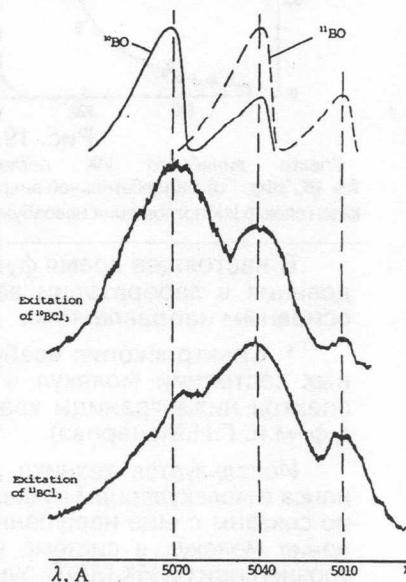


Рис. 17

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.

Наряду с исследованием изотопически селективного ИК МФД возбуждения и диссоциации молекул, в лаборатории была выполнена программа исследований по спектроскопии колебательных состояний вблизи и выше границы диссоциации. В частности, изучались процессы обратной электронной релаксации, динамика мономолекулярного распада молекул. Совместно с НИЦТЛ РАН был разработан метод и впервые измерена форма линии перевозбужденных (рис. 19) для молекул сильно перевозбужденных (до двух раз) над границей диссоциации [4].

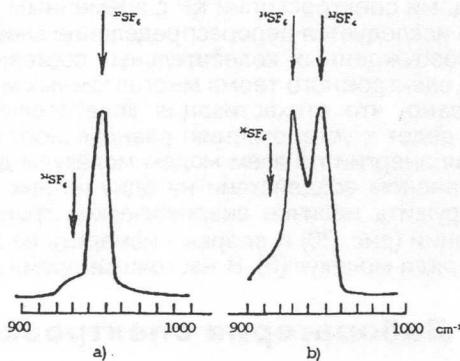


Рис. 18

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

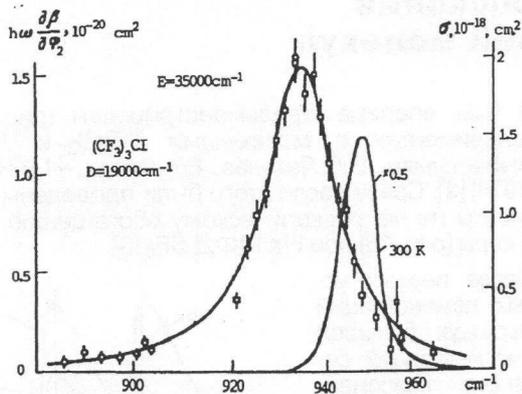


Рис. 19

Спектр линейного ИК поглощения молекул  $(CF_3)_3CI$   $h\nu \frac{\partial \beta}{\partial \Phi_2} \sim \sigma$  с колебательной энергией  $E=35000 \text{ cm}^{-1}$ . Справа показан спектр ИК поглощения невозбужденных молекул при  $T=300 \text{ K}$

В настоящее время фундаментальные исследования в лаборатории ведутся по следующим основным направлениям.

1. Спектроскопия возбужденных колебательных состояний молекул в области дискретного спектра ниже границы квазиконтинуума (группа д.ф.-м.н. Г.Н.Макарова).

Используется техника двойного ИК-ИК резонанса в молекулярном пучке. Эти исследования тесно связаны с еще нерешенной проблемой возбуждения молекул в системе нижних колебательных уровней при их ИК МФВ. Удалось значительно продвинуться в понимании этого процесса, выяснить влияние ширины спектра лазерного импульса, его формы и отстройки на эффективность ИК МФВ.

2. Механизмы формирования селективности ИК МФВ (группа д.ф.-м.н. А.А.Пурецкого).

Проведенные исследования существенно улучшили понимание механизма взаимодействия интенсивного ИК излучения с многоатомными молекулами: Это позволило, в свою очередь, достичь рекордных значений изотопической селективности ИК МФВ  $\alpha \geq \sim 10^4$  [5] при сравнительно небольших значениях изотопного сдвига. В настоящее время ведутся исследования возможности реализации не только межмолекулярной (молекулы различного сорта), но и внутримолекулярной селективности. Имеется в виду возможность достижения селективного по связям (mode-selectivity) или группе связей (regio-selectivity) возбуждения и диссоциации молекул.

3. Внутримолекулярная динамика и колебательный энергообмен (группа д.ф.-м.н. Е.А.Рябова).

Методами спектроскопии КР с временным разрешением исследуется перераспределение энергии в высоковозбужденных колебательных состояниях основного электронного терма многоатомных молекул. Показано, что стохастизация колебательного движения ведет к установлению равновесного распределения энергии по всем модам молекулы даже при резонансном воздействии на одну из них. Удалось обнаружить наличие энергетической границы стохастизации (рис. 20) и впервые измерить ее значение для ряда молекул [6]. В настоящее время ис-

следуются особенности столкновительного V-V обмена для высоколежащих колебательных состояний.

Разрабатывается также теория формирования спектра ИК переходов для высоковозбужденных молекул (к.ф.-м.н. Е. А.А.Макаров).

В ближайшей перспективе исследования внутримолекулярной динамики, и связанные с этим, проблемы реализации mode- или regio-селективности остаются одним из основных направлений работы лаборатории.

За истекшее время в лаборатории подготовлено и защищено четыре докторских и десять кандидатских диссертаций.

На основании выполненных исследований опубликовано четыре монографии:

### 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 СО-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. а) «Laser spectroscopy of highly vibrationally excited molecules», ed.by V.S. Letokhov, Adam-Hilger, Bristol, 1989. б) 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, 22, 597 (1974).
3. Р.В.Амбарцумян, Ю.А.Горохов, В.С.Летохов, Г.Н.Макаров. Письма в ЖЭТФ, 22, 96 (1975).
4. В.Н.Баграташвили, С.И.Ионов, В.С.Летохов, В.Н.Лохман, Г.Н.Макаров, А.А.Стучебрюхов. Письма в ЖЭТФ, 44, 450 (1986).
5. А.В.Евсеев, V.S.Letokhov, A.A.Puretzky. Appl.Phys. 36B, №2, 93 (1985).
6. A.L.Malinovsky, V.S.Letokhov, E.A.Ryabov. Chem.Phys., 139, №1, 229 (1989).

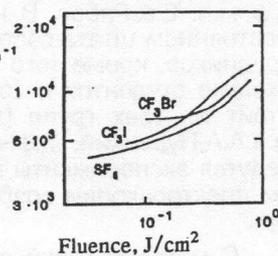
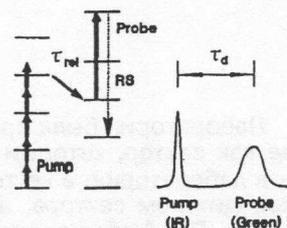


Рис. 20

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.

## Лаборатория спектроскопии ультрабыстрых процессов

Лаборатория спектроскопии ультрабыстрых процессов была организована в 1974г. сначала как сектор пикосекундной спектроскопии под руковод-

ством д.ф.-м.н. П.Г.Крюкова. Первыми сотрудниками сектора были Ю.А.Матвеев, Д.Н.Никогосян, А.В.Шарков. С 1980 г. и по настоящее вре-

мя, лабораторию возглавляет к.ф.-м.н. Ю.А.Матвеец. В штате лаборатории 9 научных сотрудников, составляющих 2 неформальные группы. Од-на из групп (рук. к.ф.-м.н. Ю.А.Матвеец) ведет работы по фемтосекундной спектроскопии конденсированных сред, другая (рук. к.ф.-м.н. В.В.Головлев) занимается исследованием воздействия лазерных импульсов на биоткани.

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 (300-50 фс) диапазонах, ставшие основными элементами пико- и фемтосекундных спектрометров.

В первых экспериментах, проведенных с помощью таких приборов, исследовались первичные фотоиндуцированные процессы в биообъектах: бактериородопсине, реакционных центрах фотосинтеза бактерий, гематопорфирине.

В цикле работ по исследованию бактериородопсина, было показано [1], 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 [2]. 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 [2] (рис.21).

С 1989 г. начаты исследования сверхбыстрых процессов в твердом теле, таких как релаксация возбужденных носителей заряда в полупроводниках, ВТСП-материалах и металлических пленках.

При исследовании динамики отражения и пропускания ВТСП пленки из  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  при начальных температурах  $T_0$  выше и ниже критической  $T_c$ , обнаружена разница в спектральных откликах (рис.22), связанная с существованием энер-

гетической щели в спектре при  $T_0 < T_c$ . Из временного отклика определен параметр электрон-фононного взаимодействия  $\lambda < \omega_2 > \sim (4 \pm 2) \times 10^2$  (meV)<sup>2</sup>, величина которого существенна для понимания механизма сверхпроводимости [3].

В экспериментах по наблюдению релаксации возбужденных носителей в стеклах, легированных  $CdSe_xS_{1-x}$ , при интенсивностях  $\sim 10^{11}$  Вт/см<sup>2</sup>, выявлены три характерных времени релаксации:  $\tau_1 \sim 10^{-14}$  с, связанное с рассеянием носитель-носитель,  $\tau_2 \sim 10^{-12}$  с, связанное с Оже-рекомбинацией и электрон-фононной релаксацией, и  $\tau_3 \sim 10^{-11}$  с, обусловленное излучательной рекомбинацией носителей [4].

Исследования по второму направлению (селективное воздействие) были начаты в 1977 г. с экспериментов по ступенчатому селективному электронному возбуждению молекулы Родамина 6Ж в растворе D<sub>2</sub>O через промежуточный коле-

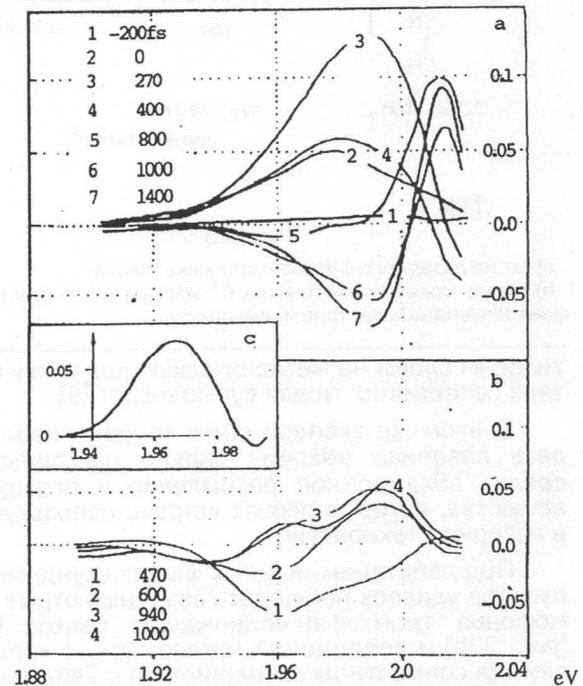


Рис. 22.

Разностные спектры мнимой части диэлектрической постоянной  $\epsilon_2$  для различных задержек зондирующего импульса  $\tau$  (фс): а)  $T_0=92$  К, б)  $T_0=68$  К, в) результат вычитания спектров а) и б) ( $\tau=1000$  фс).

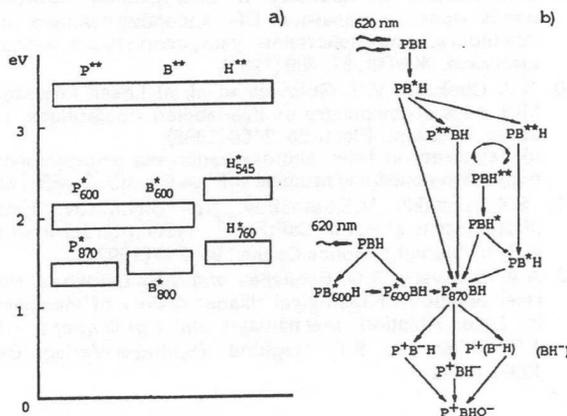
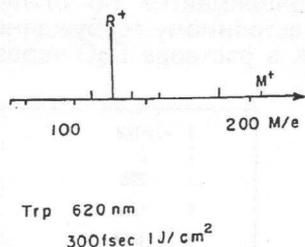
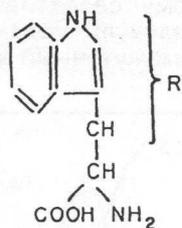
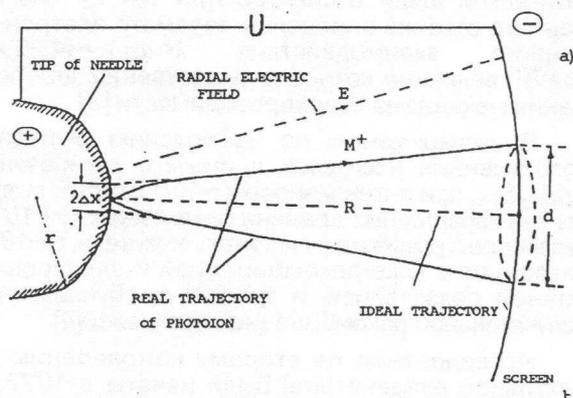


Рис. 21

а) упрощенная энергетическая диаграмма РЦ пигментов; б) схемы процессов, наблюдаемых в РЦ при различных интенсивностях возбуждения.

бательный оберточный переход [5а]. 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 [5б]. В этом же направлении, были выполнены циклы работ по многоступенчатой ионизации и диссоциации воды и водных растворов компонентов нуклеиновых кислот [6] и по нелинейному фотохимическому синтезу аминокислот [7].

Для реализации идеи лазерной фотоионной микроскопии для визуализации биомолекул [8] (рис.23а), в 1980 г. начались с помощью время-пролетной масс-спектропии эксперименты по селективному воздействию лазерных импульсов пико- и фемтосекундного диапазона на молекулы на поверхности. Обнаружен селективный фотоотрыв ионов Родамина 6Ж, нанесенного



Trp

Рис. 23

а) схема лазерного фотоионного микроскопа;  
 б) отрыв молекулярного иона  $R^+$  хромофора R триптофана фемтосекундным лазерным импульсом.

толстым слоем на металлическую подложку и потеря селективности для субмонослоя [9].

В этом же эксперименте впервые наблюдалась лазерная абляция сильно поглощающей среды, абляционное распыление и осаждение вещества, которые сейчас широко используются в лазерной технологии.

Под действием мощных фемтосекундных импульсов удалось наблюдать лазерный отрыв хромофоров триптофан-содержащих белков [10а] (рис. 23б) и соединений нуклеотидов с красителями (в совместном эксперименте с Гейдельбергским Университетом [10б]). Однако в дальнейшем эти исследования были приостановлены, так как наметился более простой путь реализации идеи [8], основанный на резонансном ступенчатом фотоэффекте на поверхности, которые недавно впервые наблюдались на примере ионов  $Sm^{2+}$  в кристалле  $CaF_2$  [11].

В 1985 г. были начаты совместно с НИЦТЛ РАН эксперименты по лазерному воздействию на биоткани и в особенности механизма импульсной лазерной абляции биоткани, являющейся основой будущей прецизионной лазерной хирургии. В ходе этих экспериментов был обнаружен ряд эффектов: аномально низкий энергетический порог абляции, генерация мощных акустических импульсов (сотни атмосфер), роль локального импульсного перегрева микрообластей ткани и т.д. [12]. Эти исследования выявили необходимость более систематических исследований в области лазерной биомедицинской спектроскопии, которые будут одним из направлений

будущих работ отдела.

За прошедшие годы в лаборатории подготовлены и защищены две докторские и пять кандидатских диссертаций.

По результатам выполненных исследований опубликована одна монография.

## Монография

- 1 а) В.С.Летохов, Ю.А.Матвеев, А.В.Шарков и др. Лазерная пикосекундная спектроскопия и фотохимия биомолекул. Изд. Наука, 1987, с.253. б) Laser Picosecond Spectroscopy and Photochemistry of Biomolecules. ed. by V.S. Letokhov (Adam Hilger, Bristol, 1987), p.309.

## Литература

1. Yu.A.Matveets, S.V.Chekalin, A.V. Sharkov. Molecular dynamics of primary photoprocesses in bacteriorhodopsin: subpicosecond study of absorption and luminescence kinetics. *J.Opt.Soc. of Am. B* 2, 634 (1985).
2. S.V. Chekalin, Yu.A. Matveets, A.P.Yartsev. Study of fast photoprocesses in biomolecules with the aid of a femtosecond laser spectrometer. *Rev.Phys.Appl.*, 22, 1761 (1987).
3. S.V. Chekalin, V.M. Farztdinov, V.V. Golovlev, V.S.Letokhov, Yu.E. Lozovik, Yu.A. Matveets, A.G. Stepanov. Femtosecond spectroscopy of  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ : Electron-phonon interaction measurements and energy gap observation. *Phys.Rev.Lett.* 67, 3860 (1991).
4. Ю.А.Матвеев, А.Г.Степанов, С.В.Чекалин, А.П.Ярцев. Лазерный спектрометр с субпикосекундным временным разрешением в применении к исследованиям сверхбыстрых процессов в конденсированных средах. *Изв.АН СССР, сер. физ.* 54, 1520 (1990).
5. а) П.Г.Крюков, В.С.Летохов, Ю.А.Матвеев, Д.Н.Никогосян и 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. Nikogosyan et al. Multiquantum photoreactions of nucleic acid components in aqueous solution by powerful ultrashort picosecond radiation. *Chem. Phys. Lett.* 61, 375 (1979).
6. D.N. Nikogosyan and V.S. Letokhov. Nonlinear laser photophysics, photochemistry and photobiology of nucleic acids. *Rev.Nuovo Cimento*, 6, 1-89 (1984).
7. 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.
8. В.С.Летохов. Применение лазерного излучения в автоэлектронной и автоионной микроскопии для наблюдения биологических молекул. *Квантовая электроника*, 2, 930 (1975); *Phys.Lett.* 51A, 231 (1975).
9. В.С.Летохов, В.Г.Мовшев и С.В.Чекалин. Фотоотрыв ионов молекул Родамина OG, адсорбированных на поверхности, под действием ультракороткого лазерного импульса. *ЖЭТФ*, 81, 480 (1981).
10. S.V. Chekalin, V.V. Golovlev et al. а) Laser femtosecond MPI mass-spectrometry of dye-labeled nucleotides. *IEEE. Journ. of Quant. Electr.* 26, 2158 (1988);  
 б) Femtosecond laser photoionization mass-spectrometry of tryptophan-containing proteins. *J.Phys.Chem.*, 92, 6855 (1990).
11. S.K.Sekatskii, V.S.Letokhov and S.B.Mirov. External photoelectric effect in  $CaF_2:Sm^{2+}$  crystals under irradiation with visible light. *Optics Comm.*, 96, 260 (1993).
12. A.A. Oraevsky, R.O. Esenaliev and V.S. Letokhov. Pulsed laser ablation of biological tissue: review of mechanisms. In: *Laser Ablation. Mechanisms and Applications*, ed. by J.C. Miller and R.F. Haglund. (Springer-Verlag, Berlin, 1991), p.112.

## ЛАБОРАТОРИЯ ЛАЗЕРНО-СПЕКТРАЛЬНОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

Основной задачей лаборатории, организованной в 1979 г., является 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.

До 1980 г. лаборатория именовалась отделом оптико-спектральной аппаратуры и задумывалась как зародыш будущего СКБ с таким профилем, призванного усилить экспериментальные работы научных лабораторий Института и способного довести их многочисленные приборные разработки до внедрения в народное хозяйство. Ввиду существовавших в то время больших организационных трудностей и одновременно сомнений в необходимости иметь небольшому академическому институту собственное хозяйственное СКБ идея трансформировалась в создание в Институте специализированной приборостроительной лаборатории, которая включила в свой состав специалистов по оптике и лазерной технике, электронно-вычислительной технике и автоматике, конструкторов, небольшой вспомогательный персонал. Для ускорения и завершения 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: оптико-механического и участка монтажа и регулировки радиоэлектронной аппаратуры. Коллектив лаборатории (без рабочих ОП) первоначально составил 16 человек, рос затем в основном за счет специалистов-прибористов из других лабораторий и по настоящее время насчитывает 31 человек. Первыми сотрудниками лаборатории были Е.Л.Михайлов, И.Н.Нестерук и В.М.Гусев. Первым заведующим с момента организации лаборатории и по настоящее время является к.ф.-м.н. О.Н.Компанец, работавший в 1979 г. старшим научным сотрудником, руководителем группы в лаборатории лазерной спектроскопии (д.ф.-м.н. В.С.Летохов).

Первые разработки лаборатории 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 (ЛИЯ-ФАН), для чего были разработаны импульсные перестраиваемые лазеры на красителях с узкой линией излучения, устройства для измерения их длины волны и выходной мощности, фоторегист-

рирующая система, различные оптико-механические узлы (оптический конструктор).

Следующим крупным шагом в развитии и становлении лаборатории стала разработка совместно с лабораторией спектроскопии высокого разрешения и аналитической спектроскопии (группа к.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 лаборатории. Для поддержки этих работ в 1985 г. при Институте был создан конструкторский отдел ЦКБ Уникального приборостроения, который возглавил к.т.н. Е.Л.Михайлов (отдел просуществовал до 1990 г.). В результате совместной работы лаборатории ЛСП и КО ЦКБ УП при научном руководстве со стороны отделов молекулярной спектроскопии (группа к.ф.-м.н. М.А.Большова) и лазерной спектроскопии (группа к.ф.-м.н. Г.И.Беква) были разработаны и изготовлены опытные образцы автоматизированных лазерных атомно-флуоресцентного (1987 г.) и атомно-фотоионизационного (1989 г.) аналитических спектрометров для ультрачувствительного определения следовых содержаний и микропримесей элементов в различных объектах с пределами обнаружения элементов (более 60) на уровне  $10^{-10}$  весовых процентов. К настоящему времени лабораторией ЛСП совместно с отделами молекулярной и лазерной спектроскопии изготовлено около 10 таких аналитических спектрометров, используемых в ИСАН и других организациях для научных исследований, контроля технологии получения высокочистых веществ, определения следов элементов в природных образцах, для контроля загрязнений окружающей среды. В процессе осуществления крупных разработок сформировался коллектив лаборатории, в костяк которой наряду с вышеупомянутыми сотрудниками вошли В.М.Апатин, Б.В.Архангельский, В.А.Веселов, А.А.Качанов, И.В.Колпаков, М.А.Павлов, В.С.Шишковский.

Сейчас усилия лаборатории смещаются в направлении создания более широкого класса аналитических приборов, использующих различные принципы и отличающихся объектами исследования, спектральным диапазоном, чувствительностью, степенью сложности, размерами, масштабом использования.

Другими направлениями работ лаборатории являются создание перестраиваемых лазеров для спектральных исследований; разработка средств управления и контроля длины волны лазерного излучения; разработка спектральных приборов высокого и сверхвысокого разрешения; создание высокочувствительных систем ре-

гистрации слабых спектров, включая многоканальные; электронные, микропроцессорные и программные средства проводимых приборных разработок; квалифицированная поддержка специалистами лаборатории приборных разработок и работ по модернизации и автоматизации экспериментальных установок в других лабораториях Института.

Коротко перечислим основные результаты разработок лаборатории по этим направлениям:

— Создана серия перестраиваемых импульсных лазеров 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 более 30 таких лазеров, половина которых работает за пределами Института, в том числе в экспериментах в ЦЕРН (Швейцария) и в Англии. Авторы разработок: к.ф.-м.н. В.М.Аптин, В.М.Гусев, к.ф.-м.н.А.А.Качанов, И.Н.Нестерук, М.А.Павлов, В.С.Шишковский.

— Разработана гамма оригинальных электромеханических устройств (сканеров) быстрого (10 с) прецизионного (0,2") углового (1+60') позиционирования оптических элементов, используемых для точной и скоростной автоматической перестройки длины волны лазеров и монохроматоров, поворота нелинейных кристаллов, управления лазерным лучом в задачах передачи оптической информации, резки материалов, в следящих системах и т.д.. Авторы разработок И.Н.Нестерук, В.А.Пакутнев, А.С.Станкевич. Изготовлено более 40 таких устройств для лазеров и других целей.

— Разработаны простые малогабаритные калибраторы длины волны лазерного излучения, которые в сочетании со сканером и с помощью простейших программных средств управления

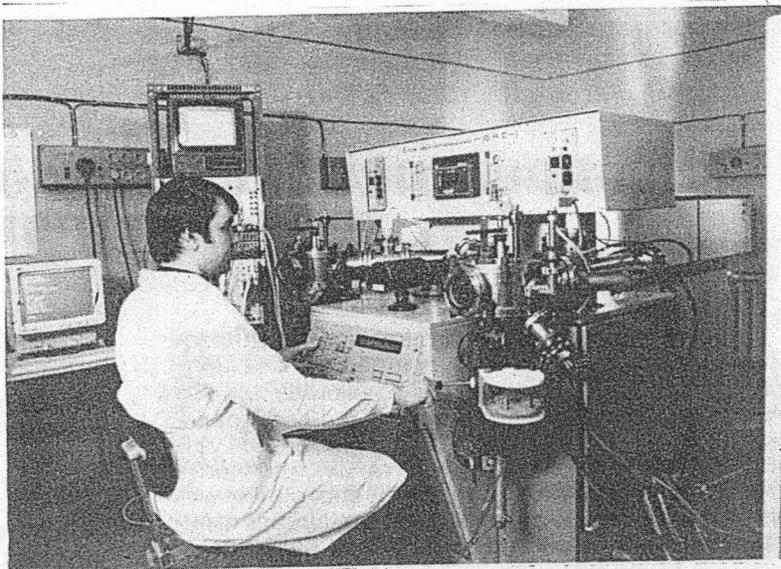


Рис. 24

Автоматизированный лазерный фотоионизационный аналитический спектрометр для ультрачувствительного определения следовых содержаний элементов и микропримесей.

позволяют устанавливать длину волны перестраиваемого лазера с точностью 5 пм (В.М.Гусев, И.Н.Нестерук, М.А.Павлов). Созданы прецизионный и компактный (200 × 100 × 100 мм) автоматические измерители длины волны импульсного и непрерывного лазерного излучения в области 400—1100 нм на основе интерферометра Физо и фотодиодной линейки с разрешением  $2 \times 10^{-7}$  и  $10^{-6}$  соответственно и порогом измерения 0,3 мкДж в импульсе (к.ф.-м.н. А.А.Качанов, А.М.Александров, И.В.Колпаков). Изготовлено более 20 калибраторов и около 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).

— Созданы высокочувствительные системы регистрации на основе фотоэлектронных и вторичных электронных умножителей (Б.В.Архангельский, И.В.Колпаков) и целая серия из 12 модификаций многоканальных оптических регистраторов спектра (к.т.н. Э.Г.Силькис, В.Д.Титов), использующих в качестве многоканальных фотоприемников различные типы линейных приборов с зарядовой связью или их волоконно-оптические сочленения с электронно-оптическими преобразователями с управлением от персональных компьютеров. Использование таких многоканальных систем регистрации вместе с малогабаритными дифракционными полихроматорами позволило создать весьма компактные спектрометры (весом до 3 кг) чрезвычайно широкого применения. Всего изготовлено более 40 систем регистрации спектров, используемых в научных исследованиях, в астрономии, геологии, криминалистике и др. областях.

— Созданы новые конструкции ато-

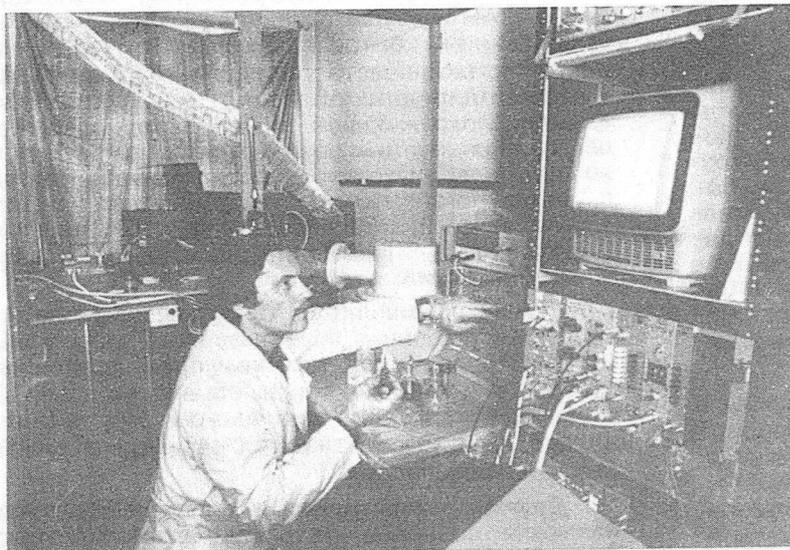
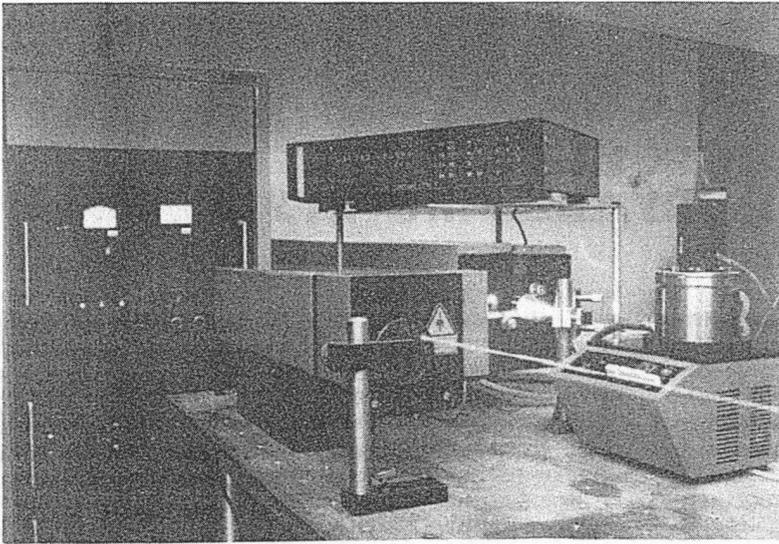


Рис. 25

Автоматизированный лазерный атомно-флуоресцентный аналитический спектрометр для ультрачувствительного определения следовых содержаний элементов и микропримесей.



низкотемпературный люминесцентный спектрометр для определения содержания 3,4-бензпирена в природных объектах (группа к.ф.-м.н. Б.М.Харламова, лаборатория ЭСМ), модернизировано и автоматизировано в Институте большое число лабораторных экспериментальных установок.

Некоторые свои новые разработки лаборатория ЛСП ведет совместно с малыми внедренческими предприятиями «Физика-Технология», «Морс», «Оптические системы», базирующимися при Институте спектроскопии, а также с внешними организациями и фирмами. Ежегодно лаборатория заключает хозяйственные договора на разработку и изготовление оптико-спектральных приборов для сторонних организаций, включая зарубежные, на сумму несколько миллионов рублей и тысяч дол-

мизаторов и вакуумных камер, источников питания, большое число электронных узлов и новые программные средства автоматизированных спектрометров (В.А.Веселов, В.С.Шишковский, М.А.Павлов, И.В.Колпаков, Б.Н.Борисов, В.В.Годнев, Г.Ю.Лопатовский, В.В.Ткачев).

— При участии специалистов лаборатории ЛСП созданы автоматизированный передвижной экспресс-анализатор металлов и сплавов (группа к.т.н. А.М.Ливщица, лаборатория СВРАС);

↑ Рис. 26. Импульсный перестраиваемый диодный лазер с накачкой лазером на парах меди.

Рис. 27. Автоматический измеритель длины волны лазера высокой точности. →

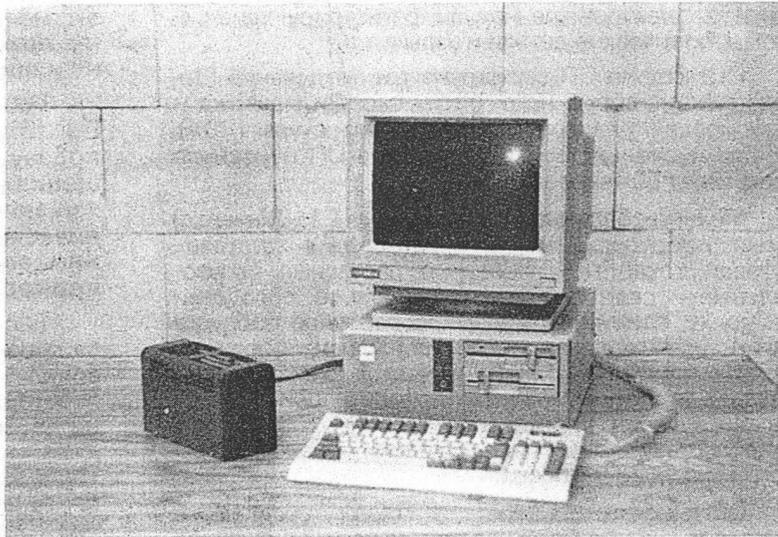
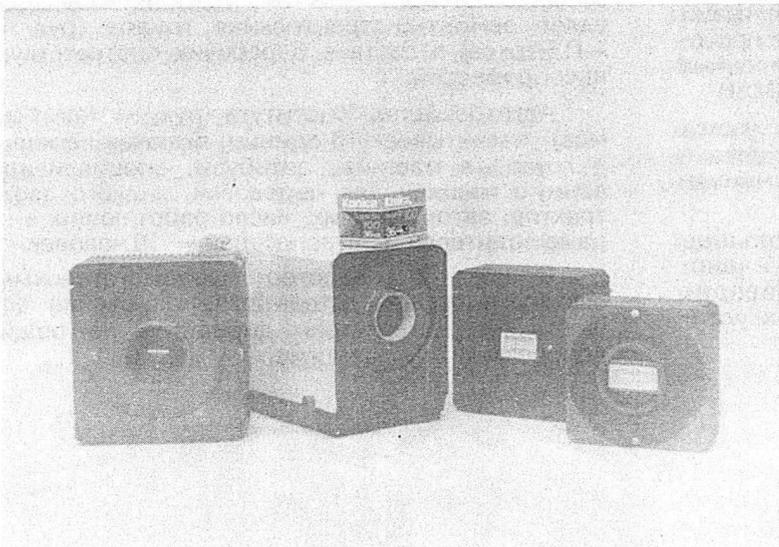


Рис. 28. Многоканальная система регистрации оптических сигналов. ↓



ларов. Лаборатория активно участвует в реализации ряда международных проектов совместно с другими лабораториями Института, в том числе в выполнении международного научно-технического проекта «Оптико-спектральная аппаратура для высоких технологий и экологического контроля» МО «Экотехнополис» (г.Троицк), учредите-

лями которого являются все институты города. Лаборатория ЛСП всегда являлась основным участником от Института ряда международных выставок, проводимых в Москве («Наука-83,88», «Оптика-87,92»), в Хельсинки, Будапеште, и предполагает экспонировать свои последние разработки на выставке «Наука-93» (Москва, ноябрь 1993 г.). Основная цель этих мероприятий — поиск новых покупателей и направлений использования наших приборов и методик, а также привлечение иностранных партнеров для совместной коммерциализации перспективных разработок.

## ОПЫТНОЕ ПРОИЗВОДСТВО. ИНЖЕНЕРНЫЕ 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. Примерный перечень изготавливаемой в ОП продукции включает в себя разнообразные спектральные исследовательские и аналитические приборы, лазеры и их элементы, вакуумные тракты, юстировочные механизмы, поворотные устройства, электронные модули, регистрирующие системы, 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 50 человек.

Механо-сборочный цех (рук. — Г.Н.Зинченко) имеет оборудование для изготовления заготовок деталей, токарные, фрезерные, расточные, шлифовальные и сверлильные станки для их обработки (около 20 единиц), газозлектросварочное оборудование, участок для проведения слесаро-сборочных работ и инструментальный участок. Как правило, наладка и запуск сложных приборов производится в лабораториях силами научных сотрудников этих лабораторий. Общее число рабочих механо-сборочного цеха — 28 человек.

Оптический цех (рук. — Р.П.Сургутсков) также 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 стеклянный участок. В цехе работает 11 рабочих.

Цех монтажа и регулировки РЭА состоит из 8 радиотехников высокой квалификации и работает в теснейшем контакте с инженерами-разработчиками РЭА из лаборатории лазерно-спектрального приборостроения. Для сверления макетов электронных плат используются венгерские установки АДМАР.

В ОП имеется небольшой (3 человека) участок подготовки оптико-механического производства в составе мастера, технолога и инженера по материально-техническому снабжению.

С ОП тесно взаимодействует небольшое отдельное конструкторское бюро из 4 человек (рук. — В.Г.Моисеев), которое проводит разработку узлов экспериментальных установок по заказам лабораторий.

Широко используя кооперативные связи с другими институтами для нанесения гальванических и лакокрасочных покрытий, производства радиомонтажных работ (Центр физического приборостроения ИОФАН), для вакуумного нанесения диэлектрических покрытий и электрополировки (ОКБ Физического института), изготовления печатных плат (ИЯИ РАН) и производства других работ, Опытное производство ИСАН в сотрудничестве с лабораториями способно изготавливать вполне современные автоматизированные экспериментальные установки и опытные образцы приборов не только для нужд лабораторий, но и по договорам для других организаций.

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 Институтом составляет примерно 1 млн.кВт-час.

В составе отдела главного инженера имеется криогенный участок (рук. — Ю.Н.Иванов, персонал — 3 человека), который снабжает лабораторию закупаемым жидким азотом и производит на своем оборудовании жидкий гелий (производительность установки 30 л/час). Годовое потребление лабораториями жидкого азота составляет примерно 60 тонн, потребление жидкого гелия 1,25 — 1,5 т/год.

Общая численность отдела — 25 человек.

Имеется специализированная группа ремонта, поверки и проката измерительных приборов и вычислительной техники (рук. — В.Г.Филиппов, 5 человек).

Текущий ремонт помещений, зданий, перепланировку помещений, возведение небольших сооружений и др. строительные работы осуществляет ремонтно-строительная группа (рук. — А.П.Барков) в составе 6 рабочих соответствующих профессий.

Автохозяйство Института (рук. — М.М.Акимов) насчитывает 16 единиц, включая легковые и грузовые машины, автобусы, специализированную машину для перевозки жидкого азота, трактор, автопогрузчик, число работающих в гараже водителей и автослесарей — 10 человек.

Общее руководство вспомогательными службами производственного назначения осуществляет заместитель директора по общим вопросам Н.И.Багданскис.

## Приложение 1.

### Список докторских диссертаций, защищенных сотрудниками ИСАН в 1969 – 1993 гг.

1. Летохов В.С. — Исследования по теории ОКГ и усилителей, 1970 г.
2. Жижин Г.Н. — Колебательная спектроскопия низкотемпературных кристаллических фаз органических веществ, 1974 г.
3. Сафронова У.И. — Методы полевой формы теории возмущений для расчета атомных характеристик, 1974 г.
4. Крюков П.Г. — Исследование методов получения мощных импульсных лазерных излучателей, 1974 г.
5. Персонов Р.И. — Тонкоструктурные электронные спектры многоатомных молекул в матрицах, 1976 г.
6. Алиев М.Р. — Исследования по теории колебательно-вращательных спектров многоатомных молекул, 1978 г.
7. Амбарцумян Р.В. — Селективная ионизация атомов и диссоциация молекул лазерным излучением, 1980 г.
8. Князев И.Н. — Молекулярные лазеры и их применение в лазерной спектроскопии молекул, 1980 г.
9. Виноградов Е.А. — Спектроскопия колебательных состояний квази-двумерных полупроводниковых структур, 1982 г.
10. Кимельфельд Я.М. — Колебательные спектры и строение реакционноспособных комплексов при низких температурах в матрицах, растворах и на поверхности, 1984 г.
11. Маврин Б.Н. — Спектроскопия гиперкомбинационного рассеяния света на колебательных возбуждениях кристаллов, стекол и жидкостей, 1985 г.
12. Иванов Л.Н. — Релятивистская теория возмущений с модельным нулевым приближением для тяжелых атомов и ионов, 1985 г.
13. Рябов Е.А. — Изотопически-селективное многофотонное возбуждение и диссоциация молекул ИК-лазерным излучением, 1986 г.
14. Никогосян Д.Н. — Двухквантовая фотоника нуклеиновых кислот, 1987 г.
15. Миногин В.Г. — Давление резонансного лазерного излучения на атомы, 1987 г.
16. Мальшуков А.Г. — Оптическая спектроскопия электронных и колебательных состояний

## Приложение 2

### Список монографий, опубликованных сотрудниками ИСАН в 1969 – 1993 гг.

1. Летохов В.С., Чеботаев В.П. Принципы нелинейной лазерной спектроскопии. М., Наука, 1975 г., 279 с. (английский перевод Letokhov V.S., Chebotayev V.P. — Nonlinear Laser Spectroscopy. Berlin-New York: Springer-Verlag, 1977, 466p.)
2. Стерин Х.Е., Алексанян В.Т., Жижин Г.Н. Каталог спектров КРС углеводородов. М., Наука, 1976, 359 с. (английский перевод Sterin Kh.E., Aleksanyan

на поверхности и границе раздела, 1987 г.

17. Пурецкий А.А. — Спектроскопия высоколежащих колебательных состояний молекул и ее применения, 1987 г.

18. Антонюк Б.П. — Спектроскопия электронных возбуждений, сильно взаимодействующих с решеткой, 1988 г.

19. Рябцев А.Н. — Спектроскопия ионов с 3d-электронами во внешних оболочках, 1988 г.

20. Рупасов В.И. — Интегрируемые задачи нелинейной резонансной оптики, 1989 г.

21. Яковлев В.А. — Спектроскопия поверхности и переходных слоев с использованием поверхностных электромагнитных волн и поляритонов, 1989 г.

22. Макаров Г.Н. — Возбуждение молекул интенсивным ИК лазерным излучением и спектроскопия колебательных возбужденных состояний, 1989 г.

23. Малявкин Л.П. — Разработка и создание средств оперативной диагностики загрязнений атмосферы методами лазерной спектроскопии, 1989 г.

24. Юдсон В.И. — Кинетика и спектроскопия низкоразмерных и неоднородных систем, 1989 г.

25. Подобедов В.Б. — Спектроскопия низкоинтенсивных процессов неупругого рассеяния света на оптических колебательных состояниях молекул и кристаллов, 1990 г.

26. Чекалин С.В. — Получение мощных световых импульсов длительностью  $10^{-10}$  —  $10^{-13}$  с. и их применение для исследования нестационарных процессов в плотной лазерной плазме и конденсированных средах, 1991 г.

27. Иванова Е.П. — Исследование спектроскопических характеристик многозарядных ионов методом релятивистской теории возмущений с модельным нулевым приближением, 1992 г.

28. Попова М.Н. — Фурье-спектроскопия высокого разрешения в исследовании кристаллов с редкоземельными ионами, 1992 г.

29. 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.

Из этого списка лишь работы В.С.Летохова и П.Г.Крюкова были выполнены до их прихода в ИСАН.

V.T., Zhizhin G.N. — Raman Spectra of Hydrocarbons. Oxford e.a.: Pergamon Press, 1980, 358p.)

3. Letokhov V.S. — Laser spectroscopy. Berlin: Acad. Verlag, 1977, 211p.

4. Letokhov V.S., Chebotayev V.P. — Nonlinear Laser Spectroscopy. 1977, 466p. (есть польский перевод, 1982 г.)

5. Агранович В.М., Галанин М.Д. Перенос энергии электронного возбуждения в конденсированных средах, М., Наука, 1978 г., 383 с. (пере-

вод на английский язык Agranovich V.M., Galanin M.D. — Electronic Excitation Energy Transfer in Condensed Matter. Amsterdam e.a., North-Holland, 1982, 371p.)

6. Агранович В.М., Гинзбург В.Л. Кристаллооптика с учетом пространственной дисперсии и теория экситонов, М., Наука, 1979 г., 432 с. (перевод на английский язык Agranovich V.M., Ginsburg V.L., — Crystal Optics with Spatial Dispersion and Excitations. Berlin e.a., Springer-Verlag, 1984, 441p.)

7. Баграташвили В.Н., Летохов В.С., Макаров А.А., Рябов Е.А. — Многофотонные процессы в молекулах в ИК лазерном поле. М., ВИНТИ, ч.1, 1980 г., 192 с.; ч.2, 1981 г., 84 с.

8. Летохов В.С., Устинов Н.Д. — Мощные лазеры и их применение. М., Сов. радио, 1980, 112 с.

9. Бобров А.В., Мулдахметов З.М. — Спектроскопия комбинационного рассеяния света, Алма-Ата, Наука, 1981 г., 151 с.

10. Papusec D.R., Aliev M.R. — Molecular Vibrational — Rotational Spectra. Prague, Academia, 1982, 323p.

11. Letokhov V.S. — Nonlinear Laser Chemistry: Multiple-Photon Excitation. Berlin e.a.: Springer-Verlag, 1983, 417p.

12. Летохов В.С. — Нелинейные селективные фотопроецессы в атомах и молекулах, М., Наука, 1983, 408 с.

13. Велихов Е.П., Баранов В.Ю., Летохов В.С., Рябов Е.А., Старостин А.П. — Импульсные СО лазеры и их применение для разделения изотопов, М., Наука, 1983 г., 304 с.

14. Жаров В.П., Летохов В.С. — Лазерная оптико-акустическая спектроскопия. М., Наука, 1984 г., 320 с. (перевод на английский язык Zharov V.P., Letokhov V.S. — Laser Optoacoustic Spectroscopy. Berlin: Springer-Verlag, 1986, 327p.)

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

16. Сафронова У.И., Сенашенко В.С. — Теория спектров многозарядных ионов, М., Сов. радио, 1984 г., 169 с.

17. Браун М.А., Гурчумелия А.Д., Сафронова У.И. — Релятивистская теория атома, М., Наука, 1984 г., 268 с.

18. Аглицкий Е.В., Сафронова У.И. — Спектроскопия автоионизационных состояний атомных систем, М., Энергоатомиздат, 1985 г., 159 с.

19. Bagratashvili V.N., Letokhov V.S., Makarov

A.A., Ryabov E.A. — Multiple photon infrared laser photophysics and photochemistry, Chur. e.a.: G + B / Harwood acad. publ., 1985, 512p.

20. Антонов В.С., Беков Г.И., Большов М.А., Летохов В.С. и др., — Лазерная аналитическая спектроскопия. М., Наука, 1986 г., 222 с. (перевод на английский язык Laser Analytical Spectrochemistry. Ed. by V.S.Letokhov, Bristol, Boston: Adam Hilger, 1986, 412p.)

21. Миногин В.Г., Летохов В.С. — Давление лазерного излучения на атомы, М., Наука, 1986 г., 222 с. (английский перевод Minogin V.G., Letokhov V.S. — Laser Light Pressure and Atoms. New York e.a.: Gordon and Breach Science publ., 1987, 248p.)

22. Летохов В.С., Матвеев Ю.А., Шарков А.В. и др. — Лазерная пикосекундная спектроскопия и фотохимия биомолекул, М., Наука, 1987 г., 252 с. (перевод на английский язык — Laser Picosecond Spectroscopy and Photochemistry of Biomolecules. Ed. by V.S.Letokhov, Bristol, Philadelphia: Hilger, 1987, 309p.)

23. Летохов В.С. — Лазерная фотоионизационная спектроскопия, М., Наука, 1987 г., 318 с. (перевод на английский язык Letokhov V.S. — Laser Photoionisation Spectroscopy. New York e.a.: Academic Press, 1987, 353p.)

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

25. Виноградов Е.А., Хаммадов И.И. — Спектроскопия объемных и поверхностных фононов кристаллов, Ташкент, ФАН, 1989 г., 165 с.

26. Летохов В.С., Макаров А.А., Макаров Г.Н., Рябов Е.А. и др. — Лазерная спектроскопия колебательно-возбужденных молекул, М., Наука, 1990, 277 с. (перевод на английский язык Laser Spectroscopy of Highly Vibrationally Excited Molecules. Ed. by V.S.Letokhov, Bristol, Adam Hilger, 1989, 384p.)

27. Летохов В.С., Чеботаев В.П. — Нелинейная лазерная спектроскопия сверхвысокого разрешения. М., Наука, 1990, 512 с.

28. Аглицкий Е.В., Рябцев А.Н., Сафронова У.И. и др. — Спектроскопия многозарядных ионов в горячей плазме, М., Наука, 1991 г., 206с.

29. Гурзядян Г.Г., Дмитриев В.Г., Никогосян Д.Н. — Нелинейно-оптические кристаллы: свойства и применения в квантовой электронике, М., 1991 г., 159 с. (перевод на английский язык Dmitriev V.G., Gurzadyan G.G., Nikogosyan D.N. — Handbook of Nonlinear Optical Crystals. Berlin e.a.: Springer-Verlag, 1991, 221p.)

### Приложение 3

#### Институт является организатором следующих двусторонних семинаров-симпозиумов:

— 4-х советско-французских симпозиумов по оптическому приборостроению (Москва — сентябрь 1976 г.; Москва, Таллин — март 1981 г.; Оссуа — октябрь 1984 г.; Москва, Вильнюс — октябрь 1988 г.).

— 10 советско-западногерманских семинаров по лазерной спектроскопии (Москва, декабрь 1979 г.; Гейдельберг — сентябрь 1980 г.;

Самарканд — май 1981 г.; Геттинген — июль 1982 г.; Москва, Вильнюс — сентябрь 1983 г.; Бонн — октябрь 1984 г.; Москва, Баку — август 1985 г.; Ганновер — сентябрь 1986 г.; Москва — май 1988 г.; Байройт — сентябрь 1990 г.)

— 3 советско-английских рабочих совещаний по спектроскопии высокоионизированных атомов (Москва — 1986, 1991 и Лондон — 1988 г.).

— 4 советско-западногерманских семинаров «Современные проблемы спектроскопии конденсированных сред» (Москва — 1984 г.; Штуттгарт — 1986 г.; Ленинград — 1989 г.; Бад-Хонепф — 1991 г.).

— 4 советско-американских симпозиумов по спектроскопии конденсированных сред (Москва — 1975 г.; Нью-Йорк — 1979 г.; Ленинград — 1984 г.; Ирвайн — 1990 г.).

— 2 советско-американских семинаров по линейной и нелинейной лазерной химии (Лос-Анжелес — 1988 г.; Москва, Ленинград — 1990 г.).

— японско-советского семинара «Нелинейные оптические материалы» (1991 г.).

— советско-итальянского семинара по спектроскопии конденсированных сред (Сиена, Италия — 1989 г.).

Кроме того, Институт внес большой вклад в организацию международных конференций, школ и рабочих совещаний:

— Международные конференции по когерентной и нелинейной оптике (Минск — 1988 г., С.-Петербург — 1991 г.),

— Международные школы «Применение лазеров в атомной, молекулярной и ядерной физике» (г.Вильнюс — 1979 г., 1981., 1984., 1987 г.),

— Вавиловские конференции по нелинейной оптике (г.Новосибирск),

— Международный конгресс по аналитической спектроскопии — КАНАС (Москва — 1990 г.),

— Международная конференция «Лазеры в науке и жизни» (Москва — 1990 г.),

— Международное совещание «Нелинейность и хаос» (Ташкент — 1990 г.),

— Советско-греческий семинар по лазерной спектроскопии (Москва — 1991 г.).

Институт являлся организатором нескольких Съездов по спектроскопии, общемосковских коллоквиумов по спектральному анализу, семинаров по физике плотной плазмы.

#### Приложение 4

### Редакционная деятельность сотрудников Института спектроскопии

#### АГРАНОВИЧ В.М.

РЕДАКТОР:

1. Серия монографий: «Modern problems in condensed matter science», Elsevier (вышло 35 томов).

2. Журнал «Solid State Communications», 1975 —

3. Журнал «Physics Letters A», 1986 —

#### БОЛЬШОВ М.А.

ЧЛЕН РЕДКОЛЛЕГИЙ ЖУРНАЛОВ

1. Spectrochimica Acta D, 1989 —

#### ЖИЖИН Г.Н.

ЧЛЕН РЕДКОЛЛЕГИЙ ЖУРНАЛОВ

1. Appl.Spectroscopy Rev., 1990 —

2. Vibrational Spectroscopy, 1990 —

#### 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 ... томов).

2. Журнал «Lasers in the Life Sciences» coeditor; 1986 —

3. Журнал «Laser Chemistry» regional editor; 1982 —

4. Журнал «Nonlinear Optics» coordinate regional editor; 1991 —

ЧЛЕН РЕДКОЛЛЕГИЙ ЖУРНАЛОВ:

1. ЖЭТФ; 1980 —

2. Квантовая электроника; 1974 —

3. Optics Communications; 1976 —

4. Optics Letters; 1977 —

5. Comments Atomic and Molecular Physics; 1977

6. Journal of Modern Optics (pance «Optics Acta»); 1986 —

7. Chemical Physics; 1981 —

8. Chemical Physics Letters, 1991 —

9. Nuovo Cimento. P.; 1977 —

10. Chinese Journal of Lasers; 1989 —

11. Applied Physics B.; 1980-1992

12. Laser Focus; 1971-1982.

#### ПЕРСОНОВ Р.И.

ЧЛЕН РЕДКОЛЛЕГИЙ ЖУРНАЛОВ

1. Chemical Physics, 1986 —

2. Оптика и спектроскопия, 1988 —

## Содержание

|  |    |
|--|----|
| ВВЕДЕНИЕ.....  | 3  |
| ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ОТДЕЛ .....  | 6  |
| ОТДЕЛ АТОМНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ.....   | 9  |
| Лаборатория атомной спектроскопии .....  | 9  |
| Лаборатория спектроскопии плазмы .....   | 12 |
| ОТДЕЛ МОЛЕКУЛЯРНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ.....  | 13 |
| Лаборатория электронных спектров молекул .....   | 13 |
| Лаборатория молекулярной спектроскопии высокого разрешения и<br>аналитической спектроскопии..... | 16 |
| Тематическая группа «Колебательные спектры молекул» .....  | 19 |
| ОТДЕЛ СПЕКТРОСКОПИИ ТВЕРДОГО ТЕЛА .....  | 21 |
| Лаборатория спектроскопии кристаллов.....  | 21 |
| Лаборатория колебательной спектроскопии конденсированных<br>сред.....                            | 23 |
| ЛАБОРАТОРИЯ СПЕКТРОСКОПИИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР .....                                       | 26 |
| ТЕМАТИЧЕСКАЯ ГРУППА МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ<br>ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ .....                  | 28 |
| ОТДЕЛ ЛАЗЕРНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ.....  | 30 |
| Лаборатория лазерной спектроскопии .....   | 30 |
| Лаборатория спектроскопии<br>возбужденных состояний молекул .....                                | 33 |
| Лаборатория спектроскопии ультрабыстрых процессов .....  | 34 |
| ЛАБОРАТОРИЯ ЛАЗЕРНО-СПЕКТРАЛЬНОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ .....  | 37 |
| ОПЫТНОЕ ПРОИЗВОДСТВО,<br>ИНЖЕНЕРНЫЕ СЛУЖБЫ ИНСТИТУТА .....                                       | 40 |
| Приложение .....   | 41 |