

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ  
М.В.ЛОМОНОСОВА**

**ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ**

**КАФЕДРА ОПТИКИ И СПЕКТРОСКОПИИ**

**История и развитие направлений учебно-научной  
работы на кафедре оптики и спектроскопии**

**В.В. Лебедева, Л.В. Лёвшин, В.В. Михайлин.**

Москва. 2005.

## Содержание

### **1. Интерференционная спектроскопия**

1.1 Развитие теории многолучевых интерферометров

1.2 Многолучевые интерференционные системы

(диэлектрические зеркала, интерференционные светофильтры)

1.3 Новые разновидности многолучевых интерферометров

### **2. Атомная спектроскопия**

#### **3. Люминесценция**

3.1 Историческое начало

3.2 Молекулярная люминесценция

3.3 Люминесценция кристаллофосфоров

#### **4. Молекулярная спектроскопия**

#### **5. Лазеры**

5.1 Работы по газовым лазерам

5.2 Работы по твердотельным лазерам

#### **6. Нелинейная оптика**

#### **7. Другие направления оптических исследований**

7.1 Исследования по синхротронному излучению

7.2 Оптика когерентного излучения

7.3 Твердотельные лазеры и волоконная оптика

#### **8. Практикумы**

8.1 История развития оптического практикума

8.2 Учебная лаборатория по специализации

8.3 Спецпрактикум кафедры

8.4 Литература по практикуму

## 1. Интерференционная спектроскопия

Интерференционная спектроскопия зародилась на рубеже XIX и XX веков, когда были предложены и практически осуществлены несколько типов интерференционных спектрометров. В 1891 г. А. Майкельсон (1852-1931) открыл тонкую структуру спектральных линий, в 1907 году сконструировал интерференционный спектрометр, состоящий из стопки одинаковых по толщине стеклянных пластинок, прозрачных или отражающих (эшелон Майкельсона). В 1901-1903 гг. О. Люммер (1860-1925) и Э. Герке (1878-1960) предложили в качестве интерференционного спектрометра использовать плоскопараллельную пластинку с боковым входом света и осуществили этот прибор, получивший название пластинки Люммера-Герке. Однако эти приборы не имели большого распространения. Французские физики Ш. Фабри (1867-1945) и А. Перо (1863-1925) в 1894-1901 гг. построили интерферометр, названный впоследствии их именами (интерферометр Фабри-Перо), отличающийся сравнительной простотой изготовления и возможностью достижения очень высокой разрешающей силы.

Интенсивное развитие интерференционной спектроскопии началось с середины XX века, когда выяснились ее огромные возможности в решении самых разнообразных задач экспериментальной физики. С тех пор интерферометры Фабри-Перо широко применяются при изучении строения ядер и электронных оболочек атомов, при исследовании физических свойств плазмы и во многих других областях физики и техники. Наконец, сами лазеры, появившиеся в 1960 г., конструктивно представляют собой интерферометр Фабри-Перо с активной средой между его зеркалами. В применении к лазерам такую систему называют оптическим резонатором с активной средой.

После окончания Великой отечественной войны в 1945 г. Ф.А. Королев вернулся к работам по интерференционной спектроскопии, к которой у него был постоянный интерес. Еще в 1940 году он опубликовал в Трудах Физического института АН свою первую работу по этой теме «О теории интерференционных спектрометров». Понимая, что успех может быть достигнут лишь при комплексном подходе к проблеме, Королев сосредоточил свои усилия по следующим направлениям:

1. Развитие теории многолучевых интерферометров.
2. Создание многолучевых интерференционных систем (диэлектрических зеркал, интерференционных светофильтров).
3. Создание новых разновидностей многолучевых интерферометров.
4. Создание источников света для исследований методами интерференционной спектроскопии (полый катод, атомные пучки).

### 1.1. Развитие теории многолучевых интерферометров

В 1953 г. вышла из печати книга Ф.А. Королева «Спектроскопия высокой разрешающей силы», посвященная вопросам теории и практики интерференционной спектроскопии. Актуальность книги была несомненна, так как в то время не имелось подробного руководства по этому быстро развивающемуся направлению. В 1957 г. Ф.А. Королев защитил докторскую диссертацию «Теория и новые методы спектроскопии высокой разрешающей силы и применения их для изучения сверхтонкой структуры спектральных линий и в астрофизике», в которой он подвел итоги своих работ по многолучевой интерферометрии.

Заслугой Ф.А. Королева является создание теории многолучевых интерферометров

с учетом дифракции на отверстиях интерферометра. Он показал, что при увеличении разности хода интерферирующих лучей предельная разрешающая сила ограничивается дифракцией на входном и выходном отверстиях интерферометра. Это важно для приборов с очень большой разностью хода лучей и для боковых порядков интерференции.

Большое внимание в своей диссертации Ф.А. Королев уделил теории и методам использования сложного интерферометра Фабри-Перо (мультиплекса), представляющего собой два интерферометра Фабри-Перо с различными расстояниями между зеркалами, размещенных один за другим на одной оптической оси. Сложный интерферометр сочетает в себе одновременно высокую разрешающую силу и большую область дисперсии и позволяет исследовать спектры с богатой сверхтонкой и изотопической структурой. Ф.А. Королев экспериментально и теоретически показал возможность осуществления мультиплекс-интерферометра с некрратным отношением расстояний между зеркалами. Он также экспериментально осуществил метод механической регулировки расстояний между пластинами интерферометров, составляющих мультиплекс, теоретически и экспериментально показал высокую эффективность работы мультиплекс-интерферометра в центральных порядках интерференции, где максимальна дисперсия, максимальна разрешающая сила и максимальна интенсивность интерференционной картины. Ф.А. Королев разработал методы практического осуществления мультиплекс-интерферометров, которые позволяют широко использовать его для изучения сверхтонкой структуры спектральных линий.

## **1.2. Многолучевые интерференционные системы (диэлектрические зеркала, интерференционные светофильтры)**

Для повышения светосилы интерферометров Фабри-Перо Ф.А. Королев считал первостепенной задачей разработку зеркал с очень малыми потерями – многослойных диэлектрических зеркал. На кафедре имелась необходимая для этого производственная база – механическая, оптическая и стеклодувная мастерские. Уже в 1948 г., когда на кафедре начала работать Т.Ф. Мещерякова (см. воспоминания Т.Ф. Мещеряковой «Лаборатория тонкослойных покрытий»), имелась напылительная установка, созданная инженером В.А. Васильевым, на которой изготавливались зеркальные металлические покрытия и проводились первые опыты по изготовлению многослойных диэлектрических зеркал.

В 1954 г., после переезда в новое здание на Ленинских горах, на кафедре была образована лаборатория тонкослойных покрытий во главе с А.Ю. Клементьевой, в 1953 г. окончившей кафедру оптики и защитившей дипломную работу по этой же тематике. Для теоретических расчетов многослойных систем был привлечен выпускник кафедры также 1953 года В.В. Сухановский. Оба они впоследствии под руководством Ф.А. Королева защитили кандидатские диссертации, Сухановский – по теоретическим и экспериментальным исследованиям многослойных диэлектрических зеркал (1960), Клементьева – по интерференционным светофильтрам для ультрафиолетовой, видимой и инфракрасной областей спектра (1964).

В лаборатории тонкослойных покрытий в разное время работали мастера-напылители Т.Ф. Мещерякова, И.А. Рамазина, З.Г. Баканова, Л.Н. Колоскова, Г.А. Куприянова, Т.М. Габелия и др., механики Н.Г. Репин, В.И. Колдаков, В.С.

Голубев, М.Е. Горшков, инженер Г.В. Собачкин. В оптической мастерской работала очень квалифицированный мастер-оптик С.К. Иванова, ранее долгие годы работавшая на Красногорском оптическо-механическом заводе и получившая еще в 1927 г. звание мастера-оптика. Она передавала свой опыт молодым сотрудникам – Н.В.Слабкой, Н.И. Ухановой и другим. Впоследствии Н.В.Слабкая стала очень искусным мастером-оптиком (см. воспоминания Н.В.Слабкой «Как я стала мастером-оптиком»). Оптическая мастерская обеспечивала кафедру высококачественными оптическими деталями – пластинами для интерферометров с высокой степенью плоскостности, подложками для интерференционных светофильтров и лазерных зеркал, различной поляризационной оптикой и др. Ф.А. Королев лично проверял качество всех пластин для интерферометров Фабри-Перо, изготавливавшихся в оптической мастерской.

В лаборатории тонкослойных покрытий силами сотрудников кафедры было создано несколько вакуумных напылительных установок для изготовления многослойных интерференционных покрытий. Установки обеспечивали вакуум  $10^{-2}$  -  $10^{-3}$  мм рт.ст. при нанесении слоев и позволяли изменять в широких пределах условия изготовления многослойных покрытий, точно контролировать толщину слоев в процессе их нанесения и получать высокую равномерность слоев по всей поверхности образцов. Разработанные методики позволяли получать интерференционные зеркала для различных областей спектра с коэффициентом отражения до 99,5% и с потерями менее 0,5%, причем эти потери были обусловлены рассеянием, а не поглощением в слоях. Поэтому такие зеркала не повреждались и при работе в резонаторах мощных лазеров.

Были найдены оптимальные условия получения пленок большого числа веществ, являющихся основой многослойных интерференционных систем для различных областей спектра в пределах от 240 нм до 7 мкм. Была разработана методика получения интерференционных зеркал и светофильтров с заданными характеристиками. Большое значение при этом имел созданный в лаборатории контроль процесса напыления слоев, основанный на интерференционных изменениях интенсивности света, проходящего через всю совокупность слоев в процессе напыления. Он обеспечивал заданное положение центра получаемой полосы прозрачности светофильтра с точностью до 10 ангстрем.

Большие успехи были достигнуты в области теории диэлектрических покрытий. Полученные результаты были с успехом применены для расчетов многих сложных оптических систем. Результаты исследований были использованы при изготовлении больших серий интерференционных зеркал и светофильтров с полосой от 100 до нескольких ангстрем и пропусканием 50-80%.

Были проведены теоретические исследования и разработаны экспериментальные методы получения многослойных систем самых разнообразных типов. Среди них следует отметить светофильтры высокой контрастности с шириной полосы пропускания от 10 до 30 ангстрем при очень малом значении фона; светофильтры, имеющие полосу шириной в несколько ангстрем при пропускании 40-50%; клиновые светофильтры на основе диэлектрических и металл-диэлектрических покрытий для областей спектра от 250 нм до 5 мкм, позволяющие в значительных пределах сканировать выделяемый фильтром участок спектра поперечным перемещением фильтра в световом луче; многослойные системы, отсекающие заданные участки спектра (коротковолновые и длинноволновые), которые служат для удаления побочных областей пропускания светофильтров и сохраняют высокое

(85-90?) пропускание в максимуме основной полосы; широкополосные отражающие системы для видимой, ультрафиолетовой и инфракрасной областей спектра с коэффициентами отражения 85-95%. Клиновые интерференционные светофильтры были использованы в созданном на кафедре скоростном сканирующем спектрометре СКФ-1, за который Ф.А. Королев и сотрудники кафедры А.Ю. Клементьева, Т.Ф. Мещерякова и В.В. Михайлин в 1965 г. были удостоены премии им. С.И. Вавилова Научно-технического общества приборостроительной промышленности СССР.

Разработанные под руководством Ф.А.Королева интерференционные системы находили широкие применения в экспериментальных работах по оптике и спектроскопии, в различных разделах новой техники, в астрофизических исследованиях и в лазерных системах.

После кончины Ф.А. Королева в 1979 г. профессор Л.С. Корниенко, являвшийся заместителем нового заведующего кафедрой оптики академика А.М. Прохорова, перевел лабораторию тонкослойных покрытий из здания физического факультета в корпус Нелинейной оптики. А.Ю. Клементьева руководила работой этой лаборатории более 30 лет – с 1954 года до конца 1986 года. После вынужденного ухода А.Ю. Клементьевой на пенсию в 1986 г., когда руководство Университета освобождало ставки, занимаемые научными сотрудниками пенсионного возраста, лабораторией до 1992 г. руководил доцент С.К. Исаев. В эти годы в лаборатории тонкослойных покрытий были разработаны методы напыления отражающих и просветляющих покрытий на торцы кварцевой сердцевины (диаметр от 5 до 20 мкм) волоконных световодов. Эти световоды длиной от нескольких сантиметров до нескольких десятков метров использовались для генерации комбинационного и бриллюэновского рассеяния в инфракрасной области спектра при накачке неодимовым лазером с длиной волны генерации 1,06 мкм. Если возбуждающим лазером являлся одночастотный неодимовый лазер (с эталоном Фабри-Перо в резонаторе), генерировалось до десятка бриллюэновских компонент в виде последовательности фемтосекундных импульсов. Одновременно в лаборатории продолжалось традиционное напыление диэлектрических лазерных зеркал, интерференционных светофильтров для ГАИШа, а также выполнялись коммерческие заказы.

После ухода С.К. Исаева с кафедры оптики летом 1992 года лабораторию несколько месяцев возглавлял сотрудник НИИЯФа Владимир Вячеславович Радченко, а в 1993-1997 годы – доцент кафедры оптики А.Б. Васильев. В эти годы лаборатория лишилась двух основных сотрудников, обеспечивавших исправность и работоспособность напылительных установок: в 1993-1994 г. в связи с болезнью уволился механик В.И. Колдаков, который вскоре и умер, а в 1995 году трагически погиб инженер Г.В.Собачкин. Происходившая в эти годы в стране «перестройка» способствовала увольнению из лаборатории многих сотрудников, старению ее оборудования, что неизбежно привело к сокращению деятельности этой лаборатории.

В настоящее время лабораторию тонкослойных покрытий в течение нескольких лет возглавляет сотрудник НИИЯФа В.В. Попов.

### **1.3. Новые разновидности многолучевых интерферометров**

Среди новых разновидностей многолучевых интерферометров в первую очередь нужно отметить клинообразный многолучевой интерферометр, сконструированный Ф.А.Королевым, А.И.Акимовым, Г.И.Кромским и И.В.Скоковым в 1965 г. Существенными преимуществами этого интерферометра являлись высокая разрешающая сила, большая линейная дисперсия, простота конструкции и малые требования к качеству оптических поверхностей. Клиновый интерферометр применялся для исследований сверхзвуковых газовых потоков в разреженных газах в ударных трубах. В этих исследованиях моделировались условия вхождения космических объектов в верхние слои атмосферы. Клиновый интерферометр с расстоянием между зеркалами 6 см и более устанавливался внутри ударной трубы, а исследуемый объект размещался между его зеркалами. Исследования проводились с ртутной лампой в качестве источника света, а затем с лазером.

Ряд работ Ф.А. Королева, опубликованных в 1957-1965 гг., посвящен теоретической разработке и практическому осуществлению (совместно с В.И.Гридневым) предложенного им нового типа многолучевого интерферометра с дифракционными зеркалами. Этот прибор был предназначен для работы в длинноволновой оптической области спектра – субмиллиметровой и миллиметровой. Используемые в этой области спектра дифракционные решетки эшелеттного типа из-за их сравнительно низкой разрешающей силы непригодны для решения многих задач.

Многолучевой интерферометр повышал разрешающую силу, достижимую в этой области спектра, примерно на два порядка. Отражателями в таких интерферометрах являлись тонкие серебряные пленки толщиной 200-300 ангстрем, нанесенные испарением в вакууме, в которых резцом прорезаны параллельные прозрачные штрихи шириной 20-100 мкм на расстоянии друг от друга 1-5 мм, образующие дифракционную решетку. В качестве подложек для дифракционных решеток использовались стеклянные пластины, тонкие пластинки из слюды или плексигласа в зависимости от области спектра, для которой предназначался данный многолучевой интерферометр. Новый тип многолучевого интерферометра с металлическими пленочными дифракционными зеркалами использовался для работы на длинах волн 4 мм и 8 мм, источником излучения служил клистрон.

## **2. Атомная спектроскопия**

В 1945-70 годах на кафедре оптики большое внимание уделялось работам по атомной спектроскопии. Это направление было очень актуально в те годы. Ф.А.Королёв читал двухсеместровый курс «Атомная спектроскопия», к этому же направлению относился курс Н.Н.Колесникова «Дополнительные главы ядерной физики», к этому же направлению примыкал курс А.Р.Стриганова «Спектральный анализ».

За эти годы на кафедре было защищено 11 кандидатских диссертаций по атомной спектроскопии и близким вопросам (из 55 защит диссертаций за этот период к тематике люминесценции относились 17, к молекулярной спектроскопии – 10, остальные к другим направлениям спектроскопии). В последующие годы в связи с появлением лазеров атомная спектроскопия постепенно заместила лазерной тематикой.

Основным руководителем направления «Атомная спектроскопия» был Ф.А.Королёв, он же был руководителем 9 диссертантов по этой тематике (по

одному диссертанту было у Н.Н.Соболева и А.Р.Стриганова). Кроме диссертационных работ, по этой тематике было выполнено большое число дипломных работ, например, студент В.Катулин защищал дипломную работу по изотопическим сдвигам самария.

Первая диссертация по атомной спектроскопии под руководством Ф.А.Королёва была защищена в 1949 г. Е.В.Загорянской и была посвящена возбуждению спектров в управляемых источниках света. После защиты Е.В.Загорянская вела занятия в спецпрактикуме кафедры и много сделала для подготовки и проведения переезда кафедры в новое здание на Ленинских горах.

В.Ф.Китаева (руководитель Н.Н.Соболев) в 1955 году защитила диссертацию «Исследование формы и ширины спектральных линий в электрической дуге постоянного тока». Тематически работа была близка к работам МГУ и ФИАН, которые начинал С.Л.Мандельштам и др.

П.С.Киреев выполнил исследование интенсивности компонент тонкой структуры водородоподобных атомов и ионов (1956). Им были детально исследованы компоненты тонкой структуры изотопов He4 и He3 и показано, что относительные интенсивности большинства компонент хорошо согласуются с теорией излучения Дирака, за исключением слабых компонент, испытывающих значительный вакуумный сдвиг. Аналогичная картина имеет место и для трития. Измерены изотопические сдвиги в линиях H-T изотопов водорода.

В диссертации А.И.Акимова (1959) «Исследование возбуждения спектров редкоземельных элементов и применение их для целей спектрального анализа» дано отнесение многих спектральных линий к ионам и нейтральным атомам, что является сложной задачей для редких земель, имеющих многочисленные линии приблизительно одинаковой интенсивности. Им разработаны методы спектрального анализа ряда редких земель, что было необходимо для лаборатории ядерной периодичности. К этой работе примыкает работа В.Б.Белянина (1959) по исследованию сверхтонкой структуры и предварительному анализу спектра гольмия. Была исследована сверхтонкая структура многих линий Ho и празеодима. Сделана попытка предварительного анализа спектра Ho методом постоянных разностей. Дана оценка магнитного момента ядра Ho.

Аспирант Ф.А.Королёва Ж.Ж.Жеенбаев из Киргизии выполнил исследование высокочастотного разряда с гидродинамическим сжатием как источника возбуждения спектра для спектроскопии (1960). Проба в виде раствора вводилась в разряд, определялась температура разряда при различных режимах работы. Выяснены причины, определяющие точность и чувствительность анализа растворов.

Под руководством Ф.А.Королёва выполнялась и работа Ю.К.Кварацхели «Исследование свойств плазменной струи как источника возбуждения излучения для экспериментальной спектроскопии» (1963). Газовый плазмотрон применен для определения сил осцилляторов трудно испаряемых проб. Разработан метод анализа шлаков при испарении пробы из канала анода.

Для исследований тонких деталей в атомных спектрах необходимо возбуждать атомы вещества таким образом, чтобы спектральные линии имели как можно меньшую ширину, в пределе – близкую к естественной ширине линий, но при этом



были бы достаточно яркими для возможности их измерения. На кафедре оптики под руководством Ф.А. Королева проводились исследования нескольких видов таких источников света. Анализируя различные способы получения источников света с узкими спектральными линиями, Ф.А. Королев в 1953 г. предложил для целей спектроскопии высокого разрешения удачную конструкцию дуговой ртутной лампы, которая в лабораторной практике получила название “лампа Королева”. Она позволяла осуществлять различные режимы работы – от силы тока в несколько миллиампер до 10 ампер и более, давала интенсивные и резкие спектральные линии. Вся лампа, кроме окна для выхода излучения, охлаждалась проточной водой, температура которой определяла величину доплеровского уширения линий ртути. В лампу был добавлен аргон при давлении 0,01 мм рт. ст.

Большое внимание Ф.А. Королев уделял источнику света с полым катодом, который дает яркие и узкие спектральные линии. Катод в таком источнике света представляет собой полый цилиндр, наружные стенки которого, в зависимости от конструкции, могут охлаждаться проточной водой или жидким азотом, что задает температуру атомов или ионов в разряде. При определенном соотношении между диаметром полого катода и давлением газа-наполнителя (обычно аргон) область отрицательного свечения, всегда яркая в прикатодной области тлеющего разряда, становится еще более яркой и оказывается сосредоточенной внутри полости катода. Разрядная трубка с полым катодом является удобным и сравнительно простым источником света для спектроскопии высокой разрешающей силы. Однако механизм процессов, определяющих его свечение, весьма сложен.

Сотрудником Ф.А. Королева В.А. Громовым в 1956 г. установлена важная роль фотоэмиссии электронов с поверхности полого катода, возникающей под действием излучаемого разрядом коротковолнового ультрафиолета. Громов добавлял к инертному газу в полый катод многоатомные газы (бензол, ксилол, различные спирты в количестве  $10^2$  по отношению к основному газу), поглощающие коротковолновое ультрафиолетовое излучение разряда. Выяснилось, что добавление этих газов действительно приводит к существенному уменьшению силы тока разряда. Молекулы этих газов-добавок, поглощая ультрафиолет, примерно за 1 минуту распадались, после чего ультрафиолетовое излучение разряда восстанавливалось и сила тока возрастала до прежней величины. Источники света с охлаждаемым полым катодом изготавливались в мастерских кафедры и широко использовались в научных и учебных лабораториях кафедры.

Доплеровское уширение спектральных линий может быть предельно уменьшено в источниках света с атомными пучками, в которых светящиеся атомы движутся перпендикулярно направлению наблюдения. Однако при высокой коллимации пучка интенсивность свечения ввиду малой плотности атомов в области возбуждения очень мала. По этой причине, а также ввиду большой сложности экспериментальной реализации такие источники света применялись крайне редко.

На кафедре во второй половине 50-х и начале 60-х годов были созданы и работали три установки с атомными пучками – две для исследования структуры спектральных линий атомов металлов и одна для газовых сред. При создании этих установок пришлось решать целый комплекс экспериментальных и технических задач – получение высокого вакуума в металлических камерах большого объема с нагреваемыми деталями, изготовление печей для испарения металлов (барий, медь, кадмий, таллий и др.), конструирование системы щелей для формирования пучка атомов, изготовление электронной пушки с жесткой фокусировкой и

высокой плотностью тока возбуждающего электронного пучка. Такие сложные установки изготавливались не в мастерских кафедры, а в центральных экспериментальных мастерских физического факультета.

Первый источник с атомным пучком на кафедре был создан В.А. Громовым, который исследовал с ним изотопическую структуру линий магния. В конструкции атомного пучка аспиранта А.И. Одинцова удалось значительно повысить интенсивность свечения (более чем на порядок) за счет изменения геометрии формирующих пучок щелей. В его установке щель испарителя длиной 2 см и коллимирующая щель пучка располагались перпендикулярно линии наблюдения, а не параллельно ей, как делалось ранее. Это позволило использовать щели большой длины без ухудшения коллимации пучка и тем самым значительно увеличить плотность атомов в зоне возбуждения их пучком электронов. Благодаря этому оказалось возможным исследовать также и слабые линии в спектрах элементов. А.И. Одинцовым была детально изучены сверхтонкая структура и изотопический сдвиг в спектре таллия не только на ярких (резонансных) линиях, но и на большом числе слабых переходов с высоколежащих уровней. Обнаружены аномалии сверхтонкого расщепления на этих переходах, которые были объяснены взаимодействием атомных конфигураций.

С помощью атомного пучка были выполнены прецизионные измерения узкого контура красной линии кадмия, которая использовалась в то время в качестве метрологического стандарта длины волны. Обнаружено, что контур этой линии является несимметричным и имеет сложную форму, обусловленную изотопическим сдвигом компонент кадмия. В этих работах участвовал студент-дипломник Б.А. Козлов, которым были выполнены расчеты формы контура линии в атомном пучке. Позже источник света с атомным пучком был успешно применен для измерения сил осцилляторов атомов.

Наибольшие трудности представляет создание источников света с атомными пучками для газов, поскольку в этом случае для поддержания высокого вакуума (до 10<sup>-6</sup> мм рт.ст.) приходится решать технически сложную проблему удаления (откачки) из объема установки рассеянных атомов пучка. В установке, созданной аспирантом (позже сотрудником) кафедры В.И. Одинцовым для этой цели была использована эффективная оригинальная система откачки высокой производительности. Было разработано также специальное устройство для предварительного охлаждения газа до температуры жидкого азота.

Для работы с газовым атомным пучком была создана чувствительная система фотоэлектрической регистрации с использованием электронно-оптического преобразователя, эксплуатацию которой успешно осуществляла дипломица Е.В.Фурсова. В качестве спектральных приборов высокой разрешающей силы использовались интерферометры Фабри-Перо толщиной 15 см и мультиплекс-интерферометры. Создание таких сложных экспериментальных установок оправдывалось тем, что в те годы не существовало других возможностей для измерения малых изотопических сдвигов или разрешения близко расположенных компонент сверхтонкой структуры. Источник с атомными пучками для газов позволил изучить изотопический сдвиг, сверхтонкую и тонкую структуру спектральных линий в инертных газах – гелии и неоне. Малость доплеровского уширения дала возможность измерить естественную ширину спектральных линий, по которой были рассчитаны значения сил осцилляторов ряда атомных переходов.

### 3. Люминесценция

#### 3.1. Историческое начало

Исследования в области люминесценции в Московском университете связаны с именами С.И. Вавилова и В.Л. Лёвшина. Избранный в 1932 г. академиком С.И. Вавилов был вынужден переехать в Ленинград для научного руководства Государственным Оптическим Институтом. После его отъезда работы в области люминесценции в МГУ возглавил профессор В.Л. Лёвшин. К нему от Вавилова, в частности, перешел аспирант В.С. Фурсов (впоследствии многолетний декан физического факультета), который начал заниматься поляризованной люминесценцией. Однако дело явно не пошло, и Фурсов после полугодовых раздумий решил стать теоретиком. В 1934 г. Академия Наук СССР была переведена из Ленинграда в Москву. В связи с этим В.Л. Лёвшин перешел на постоянную работу из МГУ в Физический институт АН СССР им. П.Н. Лебедева (ФИАН), возглавлявшийся С.И. Вавиловым. Однако он сохранил тесные связи с Московским университетом и осуществлял выполнение многих работ в области люминесценции в ФИАНе силами студентов-дипломников физического факультета. Так, в 1938 г. была опубликована работа В.Л. Лёвшина и О.А. Певуновой, посвященная изучению природы люминесценции борных фосфоров. В этом же году было выполнено исследование В.Л. Лёвшина и Э.П. Рикман по изучению механизма фосфоресценции самариевых фосфоров. В 1939 г. В.Л. Лёвшин со своими дипломниками В.Н. Алявдиным и В.В. Федоровым опубликовали результаты своих работ по изучению затухания свечения ряда фосфоров (хром-алюминатов, виллемита и др.). Наконец, из работ этого периода интересно упомянуть дипломную работу В.В. Сорокиной, которая под руководством В.Л. Лёвшина в 1936–1937 гг. изучала изменение цветности ртутных ламп при помощи родаминовых пленок. Эта работа представляла собой первое исследование в области разработки весьма экономичных люминесцентных источников света.

В самый разгар войны, осенью 1943 г., ФИАН возвратился из Казани в Москву. В начале 1944 г. В.Л. Лёвшин возобновил преподавательскую работу на физическом факультете МГУ. Он начал работать по совместительству профессором на недавно восстановленной кафедре оптики. Здесь он организовал и возглавил лабораторию люминесценции. С самого начала (1944 г.) В.Л. Лёвшин добился открытия люминесцентной специализации на кафедре оптики физического факультета МГУ. Такая специализация появилась впервые, до этого ее не было ни в одном университете страны. Эту специализацию при жизни В.Л. Лёвшина (до 1969 г.) получило более 100 человек. В течение ряда лет В.Л. Лёвшин читал студентам кафедр оптики и электроники новые, разработанные им оригинальные специальные лекционные курсы: «Люминесценция жидких и твердых веществ», «Люминофоры», «Молекулярная спектроскопия двухатомных и многоатомных молекул», руководил работой аспирантов и дипломников, а также активно участвовал во всех начинаниях кафедры и не покидал ее до последних дней своей жизни.

В.Л. Лёвшин всегда стремился широко делиться своим богатейшим педагогическим опытом. С его участием было создано много учебников и учебных пособий по физике. В 1930-1931 гг. он написал серию учебных пособий по различным разделам физики для студентов-заочников, в 1940 г. участвовал в коренной переработке учебника физики профессора В.А. Михельсона, в 1941-1944

гг. написал раздел оптики в двухтомном учебнике «Курс физики» для вузов, вышедшем под редакцией академика Н.Д. Папалекси двумя изданиями в 1947 и в 1948 гг. По его инициативе и под его редакцией коллектив преподавателей кафедры оптики физического факультета МГУ создал учебник «Методы спектрального анализа» (37 печатных листов), вышедший в издательстве МГУ в 1962 г. Неутомимая деятельность В.Л. Лёвшина в области методики преподавания существенно помогала совершенствованию подготовки научных и производственных кадров в нашей стране.

Будучи, по словам С.И. Вавилова, «выдающимся физиком-экспериментатором, работающим в течение многих лет над вопросами люминесценции», Вадим Леонидович придавал исключительное значение экспериментальной подготовке своих учеников. Он в деталях вникал в сущность проводимых экспериментов и всегда давал конкретные советы, помогавшие преодолевать трудности, встававшие перед молодым исследователем. Вместе с тем он был убежденным противником чисто эмпирических исследований, считая, что в основе каждого проводимого опыта должна лежать четкая физическая идея. А поэтому, прежде чем начинать экспериментальные исследования, молодой ученый должен глубоко овладеть основами той науки, которой решил себя посвятить. Отсюда настоятельная необходимость глубокой и органической связи между экспериментальной и теоретической подготовкой будущего специалиста. Решению этой задачи помогали труды самого В.Л. Лёвшина. В этом отношении особо следует отметить его большую (более 37 печатных листов) фундаментальную монографию «Фотолюминесценция жидких и твердых веществ», которая вышла в свет в 1951 г. Это первый советский капитальный труд в области люминесценции. Она получила широкое признание не только в Советском Союзе, но и за рубежом и была переведена и издана в Венгрии (1956), в Китае (1958). В ней В.Л. Лёвшин обобщил свои тридцатилетние исследования в области люминесценции. Монография явилась наиболее полным обзором работ советских и зарубежных ученых в данной области знаний. Ее значение было очень велико, так как она служила настольной книгой молодым физикам, избравшим люминесценцию своей специальностью. Значительную помощь монография оказала и практическим работникам, получившим возможность в систематической форме ознакомиться с физическими основами люминесценции.

В 1951 г. Ученый Совет Московского университета выдвинул монографию В.Л. Лёвшина на соискание Сталинской премии. Однако случилось так, что одновременно ФИАН выдвинул на ту же премию цикл работ Вадима Леонидовича по вспышечным фосфорам (Сталинская премия, 1952 г.). В связи с этим рассмотрение вопроса о премии за его монографию было отложено. В ноябре 1952 г. Ученые Советы физического факультета МГУ и ФИАН, а также группа ведущих ученых ленинградского Государственного оптического института вновь представили монографию В.Л. Лёвшина в комитет по Сталинским премиям по разделу учебников. В многочисленных отзывах крупнейших специалистов работа В.Л. Лёвшина получила очень высокую оценку (академик А.Н. Теренин, профессора П.А. Бажулин, Б.Я. Свешников, А.А. Соколов и многие другие). Однако при выдвижении работы на Ученом Совете в ФИАНе возник неожиданный скандал. Первый аспирант и сотрудник В.Л. Лёвшина, ставший к этому времени уже доктором наук, В.В. Антонов-Романовский подал в Ученый Совет большой и резко отрицательный отзыв на работу своего учителя. Он указывал на многочисленные «ошибки» В.Л. Лёвшина и к тому же считал, что развиваемые им некоторые научные направления имеют целью дискредитировать ряд работ

недавно скончавшегося С.И. Вавилова. Председатель Совета академик Д.В. Скобельцын был вынужден создать специальную комиссию по разбору возникшего конфликта. В своих лаконичных и корректных ответах В.Л. Лёвшин убедительно доказал всю несостоятельность нападков своего бывшего аспиранта. Подводя итог, он сказал: «Таким образом, возражения В.В. Антонова-Романовского представляют собой собрание прямых ошибок, несерьезных придирок и необоснованных тенденциозных утверждений». Выступление В.Л. Лёвшина было очень убедительным. Совет единодушно проголосовал за представление монографии В.Л. Лёвшина на соискание Сталинской премии. Прохождение дела в Комитете шло очень гладко. Работа успешно прошла все инстанции. Осталась лишь завершающая подпись самого Сталина. Однако 5 марта 1953 г. И.В. Сталин скончался. Вопрос о Сталинских премиях был сначала отложен, а затем они и вовсе были отменены.

В результате В.Л. Лёвшин так и не стал трижды лауреатом Сталинской премии. Однако это вовсе не умалило значения его классического труда, по которому училось люминесценции не одно поколение студентов страны. Шли годы, наука бурно развивалась, и часть приведенного в монографии материала, естественно, устаревала. В.Л. Лёвшин получал десятки писем и устных просьб со стороны научных сотрудников страны обновить и переиздать столь нужную им монографию, которая очень скоро стала библиографической редкостью. Вадим Леонидович мечтал осуществить эту большую и ответственную работу. Он задумал по существу новую книгу в двух томах, первый из которых намеревался посвятить молекулярной люминесценции, а второй – особенностям рекомбинационного свечения кристаллофосфоров. Он выделил специальные папки, куда собирал необходимый материал и написал для книги ряд новых параграфов. Однако занятость срочными делами и плохое состояние здоровья так и не позволили ему завершить этот огромный труд.

Всю жизнь, занимаясь педагогической деятельностью и непрерывно работая со студентами, аспирантами и молодыми научными сотрудниками, В.Л. Лёвшин испытывал большое удовлетворение от общения с молодежью. Он никогда не жалел времени для своих учеников, часто откладывая ради них другие, порой гораздо более срочные и важные дела. Работая со своими молодыми помощниками, он старался предоставлять им максимальную самостоятельность, развивать их инициативу. Вадим Леонидович никогда не навязывал свою точку зрения, а лишь давал советы, предостерегал от возможных промахов и ошибок. Его руководство никогда не было общим и поверхностным. Он всегда старался вникать во все детали проводимых исследований и в случае необходимости оказывать своему сотруднику действенную, конкретную помощь. Его ученики относились к своему руководителю с огромным уважением и любовью и пронесли эти чувства к учителю через всю свою жизнь. Остановимся на основных научных результатах, которые были получены на кафедре оптики в области люминесценции в период 1945-1979 гг.

В предвоенные годы в Московском университете были достигнуты весьма значительные успехи в области люминесценции. Война прервала эти исследования. По ее окончании столь успешно начатые работы были продолжены, люминесцентные исследования были развернуты широким фронтом. Получили развитие работы как в области молекулярной люминесценции, так и в области изучения свойств рекомбинационного свечения кристаллофосфоров.

### 3.2. Молекулярная люминесценция

В области молекулярной люминесценции особое внимание уделялось изучению процессов межмолекулярного и внутримолекулярного взаимодействия в конденсированных растворах различных органических соединений и, в первую очередь, красителей. Эти проблемы занимали одно из центральных мест в научном творчестве В.Л. Лёвшина. Они привлекали его внимание на протяжении большей части его жизни. Первую работу в этом направлении он опубликовал в 1927 г., последнюю – накануне своей кончины, в 1968 г. Исследования, проводившиеся В.Л.Лёвшиным и его учениками в МГУ и ФИАНе, привели к созданию стройной теории разнообразных концентрационных эффектов, развивающихся при значительном уменьшении межмолекулярных расстояний.

Прежде всего В.Л.Левшин заинтересовался природой широко распространенного явления концентрационного тушения люминесценции – падения выхода свечения при возрастании концентрации вещества в растворе. Этот эффект был обнаружен англичанином Д. Стоксом (1819-1903) еще в середине позапрошлого столетия, но оказался очень сложным, был недостаточно изучен и для его объяснения предлагалось много противоречивых гипотез.

Уже в первой работе этого цикла В.Л. Лёвшин доказал, что ход концентрационного тушения люминесценции у двух красителей родулина и флуоресцеина, помещенных в сахарные леденцы, практически совпадает с ходом их тушения в жидких растворах. Этот вывод имел принципиальное значение, так как доказывал, что концентрационное тушение вызывается не соударениями соседних молекул, а статистическим взаимодействием между ними. Результат, полученный В.Л.Лёвшиным, доказал несостоятельность многих представлений о природе концентрационного тушения люминесценции, существовавших в те годы.

Выясняя условия возникновения зеркальной симметрии спектров поглощения и люминесценции, В.Л.Лёвшин изучил влияние на них различных факторов – температуры растворителя и концентрации. Одним из наиболее удобных объектов для исследования, у которого эти эффекты проявляются очень сильно и своеобразно, оказался краситель родамин 6Ж. Так был найден наиболее эффективный краситель, в дальнейшем нашедший широчайшее применение в лазерах с плавно перестраиваемой частотой – лазерах на красителях.

Изучая растворы этого красителя, В.Л.Лёвшин обнаружил резкую зависимость хода концентрационного тушения его люминесценции от физико-химических свойств используемого растворителя. Так, в спиртах тушение вовсе не проявляется в очень широком диапазоне концентрации. Напротив, в воде начиная с концентрации  $\sim 2 \cdot 10^{-4}$  г/мл происходит сильное тушение этого красителя, а при  $2 \cdot 10^{-3}$  г/мл выход его свечения становится близким к нулю. Одновременно с тушением свечения в водных растворах родамина 6Ж возникают резкие деформации его видимой электронной полосы поглощения. Ее длинноволновый максимум, характерный для разведенного раствора, быстро падает, а вместо него развивается новый коротковолновый максимум. При этом все семейство спектров поглощения пересекается в одной, так называемой изобестической, точке. В спиртах и других органических растворителях спектры поглощения остаются стабильными в широком диапазоне концентраций. Не возникает в этом случае и концентрационного тушения люминесценции.

В большинстве случаев, включая и водные растворы, форма спектров люминесценции остается неизменной при возрастании их концентрации. Однако у некоторых веществ в определенных условиях может наблюдаться возникновение новых полос излучения, смещенных в сторону длинных волн по отношению к спектру люминесценции разведенного раствора.

Далее было установлено, что все описанные концентрационные эффекты полностью обратимы. Первоначальные свойства разведенных растворов восстанавливаются при разбавлении концентрированных растворов, а также при их нагревании. Была обнаружена и зависимость хода концентрационного тушения от длины волны возбуждающего света.

Для объяснения всех этих разнообразных эффектов В.Л. Лёвшин выдвинул ассоциативную теорию. Согласно его представлениям, при увеличении концентрации происходит сближение молекул красителей, которое может привести к их агрегации. Возникающие ассоциированные комплексы (в простейшем случае димеры) обладают своими индивидуальными оптическими свойствами, отличными от свойств мономерных молекул. Как правило, объединяясь в ассоциаты, молекулы красителя утрачивают свою люминесцентную способность, что приводит их к тушению люминесценции. В случае возникновения люминесцирующих ассоциатов в спектре люминесценции появляется новая длинноволновая полоса. При этом в обоих случаях образование ассоциатов сопровождается возникновением новой полосы поглощения при постепенном уменьшении поглощения мономерных молекул. На развитие ассоциационного процесса большое влияние оказывает окружающая среда. Одни растворители (вода) способствуют образованию ассоциированных комплексов, другие (спирты) препятствуют их возникновению. Любое уменьшение ассоциации (разведение раствора, его нагревание, использование неподходящего растворителя) приводит к восстановлению первоначальных свойств разведенного раствора, появлению полос поглощения и люминесценции мономерных молекул и увеличению выхода его люминесценции. Эти представления оказались плодотворными и дали возможность В.Л. Лёвшину объяснить большую часть концентрационных эффектов, развивающихся в растворах красителей. Вместе с тем, они позволили создать новый спектроскопический метод изучения такого важного процесса, как процесс молекулярной ассоциации. Так, еще в 1935 г. В.Л. Лёвшин предложил три различных независимых метода определения степени ассоциации молекул в растворе. Оказалось, что значение этой важной величины можно установить по концентрационным деформациям электронных полос поглощения, по ходу концентрационного тушения люминесценции, а также по различиям в развитии этого процесса при возбуждении свечения в максимумах поглощения мономеров и ассоциатов. На примере водных растворов родамина 6Ж было показано, что все три метода дают хорошо совпадающие результаты.

При рассмотрении всего обширного комплекса концентрационных эффектов ассоциационные представления встречали и существенные трудности. Исходя из них, не удавалось, например, объяснить такие важные явления, как концентрационную деполаризацию свечения, сенсibilизированную люминесценцию и концентрационные изменения среднего времени возбужденного состояния исследуемых молекул ?. К тому же широкое распространение получили и другие представления о природе концентрационных эффектов. В их основе лежала высказанная в 1927 г. французским физиком Ж. Перреном (1870-1942) идея о возможности резонансной передачи (миграции) энергии возбуждения между

соседними близко расположенными молекулами. Наиболее полно эти представления были развиты в работах С.И. Вавилова, а впоследствии немецких физиков Т. Ферстера и Д. Декстера и вавиловского ученика М.Д. Галанина. Эти авторы считали, что такие эффекты, как концентрационная деполяризация, концентрационное тушение, концентрационные изменения  $\lambda$ , сенсibilизированная люминесценция и некоторые другие, обусловлены физическими межмолекулярными взаимодействиями и связанной с ними резонансной миграцией энергии возбуждения. Эти представления также получили ряд убедительных экспериментальных подтверждений. В частности, дипломник кафедры оптики Л.В.Лёвшин экспериментально обнаружил в 1950 г. явление тушения люминесценции посторонними нелюминесцирующими поглощающими веществами, существование которого было предсказано С.И. Вавиловым на основе развиваемых им представлений.

Вместе с тем авторы миграционной теории не могли объяснить такие важнейшие эффекты, как концентрационные деформации спектров поглощения и люминесценции, их температурную зависимость и ряд других явлений. Кроме того, и истолкование концентрационного тушения люминесценции миграцией энергии возбуждения между мономерными молекулами представлялось недостаточно убедительным и требовало дальнейших экспериментальных подтверждений. Указанные трудности не были преодолены в этих работах. Их авторы по существу игнорировали многие из перечисленных выше эффектов, считая, что они вызваны не физическими, а физико-химическими факторами, которые не подлежат рассмотрению в рамках их теории.

Такая двойственность в объяснении концентрационных эффектов, десятилетиями бытовавшая в науке, вызывала у В.Л. Лёвшина чувство глубокого неудовлетворения. Анализируя свои данные и результаты других авторов, он пришел к выводу, что только объединение представлений о молекулярной ассоциации и миграции энергии возбуждения позволит с единой точки зрения объяснить все многообразие сложных концентрационных эффектов. Начинать эту работу следовало с расширения классов соединений, подлежащих исследованию, и углубленного изучения природы их межмолекулярных взаимодействий в различных средах и под влиянием разнообразных внешних воздействий. Эти обширные исследования В.Л. Лёвшин решил осуществить в своей люминесцентной лаборатории на кафедре оптики МГУ с помощью своих дипломников, аспирантов и сотрудников.

Первой послевоенной аспиранткой В.Л.Лёвшина была Т.М. Тарасова (1948-1951). Ее большое и обстоятельное исследование было посвящено влиянию температуры и природы растворителя на поглощение и излучение производных акридина. Полученные в работе Т.М. Тарасовой результаты вскрыли весьма интересные оптические свойства молекул акридина и его многочисленных производных. Это дало основание аспиранту профессора П.А. Бажулина Л.В. Лёвшину (1950-1953) предпринять исследование межмолекулярных взаимодействий в концентрированных растворах молекул акридинового ряда.

В диссертационной работе Л.В.Лёвшина подробно изучалось влияние концентрации на все важнейшие оптические свойства большого числа акридиновых веществ: концентрационные зависимости спектров поглощения и люминесценции, относительного выхода свечения, поляризационных спектров и среднего времени возбужденного состояния их молекул. Было показано, что все



они, как правило, претерпевают сильнейшие концентрационные изменения.

В более поздних работах Л.В.Лёвшина было показано, что указанные концентрационные эффекты обусловлены не ассоциацией, как казалось вначале, а ионизацией молекул акридинов. Последняя возникает вследствие того, что все соединения акридинового ряда обладают основными свойствами и при возрастании их концентрации величина рН раствора увеличивается на несколько единиц. Таким образом, в растворах разной концентрации присутствуют молекулы по крайней мере двух типов – ионизованные и неионизованные, каждая из которых обладает своими индивидуальными абсорбционными и люминесцентными свойствами. Подробное изучение этих эффектов позволило не только разобраться в характере процессов, происходящих в концентрированных растворах акридиновых соединений, но и разработать люминесцентный метод изучения процессов ионизации, связав их с конкретной структурой исследуемых молекул. Цикл этих работ был отмечен Ученым Советом МГУ в 1958 году почетной Ломоносовской грамотой.

В 1951 г. под руководством В.Л.Лёвшина аспиранткой Л.Д.Деркачевой (1952-1955) были исследованы концентрационные эффекты в растворах цианиновых красителей. Эти красители замечательны тем, что при больших концентрациях в воде они приобретают люминесцентные свойства, которые отсутствуют у них в разведенных растворах. Это явление так называемого «отрицательного концентрационного тушения люминесценции» было открыто немецким физиком Г. Шайбе еще в 1936 г. Однако очень многие стороны его оставались невыясненными.

В работе Л.Д. Деркачевой было изучено изменение оптических свойств ряда цианиновых соединений при изменении концентрации, температуры, природы растворителя и структуры исследуемых молекул. Было установлено, что «отрицательное концентрационное тушение» проявляется у многих цианиновых красителей и что все наблюдаемые эффекты обусловлены образованием в растворах огромных ассоциированных макромолекул, содержащих до 106 мономеров и обладающих люминесцентными свойствами. При этом ассоциаты имеют строго упорядоченное строение. Л.Д. Деркачева показала, что основным строительным материалом этих ассоциатов служат димеры, образующиеся в растворах уже при весьма малых концентрациях цианиновых соединений. Начиная с 1957 г. процессы молекулярной ассоциации в растворах красителей широко изучались в большом цикле работ, выполненных на кафедре оптики под руководством доцента Л.В. Лёвшина. В этих работах по изменениям электронных и колебательных спектров поглощения исследовались природа сил, обуславливающих ассоциацию молекул красителей, влияние природы растворителя на развитие этих процессов, а также их зависимость от структуры исследуемых молекул. Кроме того, изучалась природа концентрационного тушения в этих растворах. В упомянутых работах было опровергнуто утвердившееся в литературе мнение о том, что ассоциация молекул красителей может развиваться лишь в средах с большой диэлектрической постоянной ? (в воде). Основанием для этого предположения служило представление о том, что в растворителях с большой ? кулоновское отталкивание одноименно заряженных ионов красителя сильно ослабляется, облегчая их объединение между собой. Однако подробные опыты с различными растворителями показали, что ассоциация молекул красителей может полностью отсутствовать в широком диапазоне концентраций в средах с огромным значением ? и развиваться в полной мере в растворителях с очень незначительной величиной диэлектрической постоянной.

В дальнейших работах Л.В.Лёвшина с А.П.Головиной, дипломницей Е.А.Бобровской и аспиранткой Т.Д.Славновой (1965-1967) было показано, что в растворах красителей образуются так называемые ионные пары, состоящие из катионов и анионов, в которых электрические заряды оказываются скомпенсированными. Эти ионные пары ассоциируют между собой, благодаря чему величина  $\epsilon$  не оказывает определяющего влияния на образование таких ассоциатов. Вместе с тем, в этих работах была впервые установлена резкая зависимость ассоциации от природы использованного аниона; тем самым было доказано, что атомы принимают активное и непосредственное участие в ассоциационном процессе.

В серии исследований Л.В.Лёвшина и его аспирантов В.Г.Бочарова и Д.М.Акбаровской (1966-1968) показано, что некоторые красители (например родамин бЖ) могут ассоциировать еще более интенсивно, чем в воде, в бинарных смесях малых количеств полярных растворителей с большим количеством неполярных растворителей. Оказалось, что ассоциация резко возрастает при увеличении неполярного компонента в бинарной смеси. Подробное изучение этих эффектов, проведенное Л.В.Лёвшим и Д.М. Акбаровской, показало, что молекулы полярных растворителей, активно взаимодействуя с молекулами красителя, препятствуют развитию их непосредственной ассоциации. При этом сила этого взаимодействия, как правило, определяется донорно-акцепторной активностью молекул используемого полярного растворителя. Обратное стимулирующее действие на ход развития ассоциационного процесса оказывают молекулы неполярного растворителя. Однако сила этого влияния в очень сильной степени зависит от их структуры. В тех случаях, когда неполярные молекулы имеют возможность взаимодействовать с молекулами красителя, например при помощи  $\pi$ - $\pi$  электронных облаков, ассоциационный процесс в значительной степени оказывается ослабленным.

Накопленный большой экспериментальный материал позволил Л.В.Лёвшину и его сотрудникам прийти к выводу о том, что ассоциация молекул красителей происходит не только за счет дисперсионного взаимодействия, как считали многие авторы, а во многом определяется образованием между ними водородных связей. В пользу этих представлений говорит резкая зависимость ассоциационного процесса от структуры взаимодействующих молекул и значительная величина ( $\sim 5-10$  ккал/моль) энергии связи возникающих ассоциатов. Кроме того, в работах Л.В.Лёвшина, Л.А.Игнатъевой и Т.Д.Славновой удалось осуществить и прямые опыты, подтверждающие справедливость этой точки зрения. В этих работах были измерены инфракрасные спектры ряда красителей, обладающие активными N-H-группами. Оказалось, что при увеличении концентрации красителя, а также при возрастании содержания неполярного компонента бинарного растворителя происходит быстрое уменьшение полосы свободных N-H-колебаний ( $\nu_M=3445$  см<sup>-1</sup>) и возрастание широкой длинноволновой полосы, соответствующей связанным N-H-колебаниям ( $\nu_D=3200$  см<sup>-1</sup>). Таким образом, эти опыты доказали образование при больших концентрациях водородных связей между молекулами исследуемых красителей через их активные N-H-группы.

В дальнейшем в работе Л.В.Лёвшина, Т.Д.Славновой и аспиранта Ю.А.Митцеля (1967-1969) отмечено, что объединение молекул красителей действительно происходит при помощи водородных связей, которые проявляются в описанных выше изменениях их инфракрасных спектров поглощения. Наблюдаемые же при

ассоциационном процессе деформации электронных спектров поглощения вызываются резонансным взаимодействием, которое резко возрастает при значительном сближении молекул красителей, происходящем при образовании водородных связей между ними.

Под руководством Л.В.Лёвшина была выполнена диссертационная работа В.Г.Бочарова (1966-1968), одним из основных направлений которой было выяснение природы концентрационного тушения люминесценции растворов красителей. Перед автором была поставлена задача сделать обоснованный выбор между миграционной и ассоциационной точками зрения на происхождение этого важного эффекта.

Занимаясь проблемой объединения указанных представлений, в 1955 г. В.Л.Лёвшин предположил, что в наиболее типичных случаях концентрационное тушение обусловлено двумя сосуществующими процессами: неактивным поглощением нелюминесцирующих ассоциатов и миграцией энергии возбуждения с мономеров на эти ассоциаты. В ФИАНе и на кафедре оптики МГУ были поставлены работы по экспериментальной проверке этих представлений и количественному разделению различных видов концентрационного тушения. В работах Л.В.Лёвшина и В.Г.Бочарова было показано, что у родаминовых красителей основную роль в развитии тушения играет неактивное поглощение нелюминесцирующих ассоциатов. Напротив, у растворов эозина основной вклад в тушение вносит миграция энергии возбуждения на ассоциаты такого рода. У растворов других красителей наблюдаются промежуточные случаи.

В последующей работе Л.В.Лёвшина и его аспиранта Н.Низамова (1967-1969) была осуществлена широкая экспериментальная проверка ассоциационной теории концентрационного тушения люминесценции и доказана ее полная справедливость. Вместе с тем установлено, что миграция энергии между люминесцирующими мономерами не приводит к развитию безызлучательных процессов и тушения свечения не вызывает.

Таким образом, многолетний спор о природе концентрационных эффектов в растворах сложных органических соединений был, наконец, разрешен. Согласно, как и предполагал В.Л.Лёвшин, было найдено на пути объединения физических и физико-химических взаимодействий между молекулами в концентрированных растворах. Проблема была всесторонне обсуждена и экспериментально обоснована в докторской диссертации Л.В.Лёвшина «Спектроскопическое исследование процессов межмолекулярного взаимодействия в растворах красителей и других сложных органических соединений», которая была успешно защищена на физическом факультете МГУ в 1967 г.

Работа вызвала большой интерес, так как содержала многочисленные сведения об оптических свойствах многих красителей и, прежде всего, о родамине 6Ж. Ее появление совпало с началом интенсивного изучения лазеров с плавно перестраиваемой частотой (лазеры на красителях). В частности, родамин 6Ж оказался одним из наиболее эффективных веществ для лазерных сред, содержащих красители.

После защиты докторской диссертации Л.В.Лёвшиным исследования природы молекулярной ассоциации в концентрированных растворах красителей и ее спектроскопических проявлений были продолжены в серии кандидатских

диссертаций, выполненных под его руководством. В этих работах большое участие принимала его бывшая аспирантка, кандидат физ.-мат. наук Т.Д. Славнова.

Первой такой диссертацией была работа аспиранта В.И. Южакова (1972-1974), посвященная изучению концентрационных эффектов в спиртовых растворах родаминовых красителей и пигментов. До этой работы оставалась неясной природа концентрационного тушения люминесценции красителей в полярных органических растворителях, где их электронные спектры поглощения и люминесценции остаются стабильными в широком интервале концентраций. При этом было неизвестно, насколько эффективно ассоциируют молекулы красителей в таких полярных средах.

В работе было показано, что, несмотря на практическое отсутствие заметных концентрационных деформаций электронных спектров родаминов в спиртах, в этом случае также происходит образование нелюминесцирующих ассоциатов. Эти ассоциаты имеют спектр поглощения, близкий со спектром поглощения мономеров. Правда, в этом случае угол между плоскостями мономерных молекул в димерах составляет более  $130^\circ$ , т.е. объединившиеся в димер мономеры располагаются в нем практически "встык" друг к другу. В этом случае наличие концентрационного тушения люминесценции в таких растворах не вызывает сомнений. Эти результаты были получены оригинальными концентрационными измерениями среднестатистического молекулярного веса красителя в полярных растворах.

Было установлено, что при наличии таких ассоциатов основная роль отводится миграционному тушению. Показано, что существенное уменьшение температуры усиливает ассоциационный процесс и оказывает существенное влияние на строение ассоциированных комплексов.

В работе изучены условия образования люминесцирующих ассоциатов. Показано, что спектр свечения люминесцирующих ассоциатов состоит из двух полос, принадлежащих одному электронному переходу. Установлено, что люминесцирующие ассоциаты – это димеры родаминовых красителей с углом между плоскостями составляющих их мономеров менее  $90^\circ$ .

В работе также обсуждена природа сил, объединяющих молекулы родаминовых красителей в ассоциаты. Полученные экспериментальные данные указывают на то, что ассоциация молекул родаминовых красителей в полярных растворителях в основном обусловлена силами Ван-дер-Ваальса.

Анализ многочисленных экспериментальных данных, приведенных выше, показал, что объединение ионных пар красителей в ассоциаты может осуществляться за счет образования водородных связей. Возможность их возникновения определяется структурой взаимодействующих молекул и свойствами окружающей среды. После образования водородных связей входящие в ассоциат молекулы располагаются в непосредственной близости друг от друга, что способствует развитию сильного взаимодействия резонансного типа между ними, которое вызывает наблюдаемые на опыте деформации их электронных спектров поглощения.

Вместе с тем, из полученных данных можно сделать предположение, что способ закрепления молекул красителя друг около друга несущественен для характера наблюдаемых спектральных изменений. Важно лишь чтобы молекулы достаточно

долгое время находились в непосредственной близости друг от друга на расстоянии  $\sim 10\text{Å}$ . В этом случае объединение молекул красителей в ассоциаты является лишь одним из таких способов. Для экспериментальной проверки этих предположений была поставлена диссертационная работа аспирантки И.В. Пеновой (1972-1974) под названием: «Спектроскопическое изучение взаимодействия красителей с высокомолекулярными веществами (ВМВ)».

Известно, что при добавлении к водным растворам красителей ВМВ наблюдаются значительные деформации их электронных спектров поглощения – возникает так называемый эффект метахромазии. В случае люминесцирующих красителей это одновременно сопровождается изменением выхода свечения и смещением спектра люминесценции. Эффект метахромазии удобно использовать в качестве моделей, позволяющих глубже проникнуть в природу межмолекулярных взаимодействий. Создание таких модельных систем можно осуществить путем использования ряда красителей и полимеров с закономерно меняющейся структурой их молекул. В случае эффекта метахромазии молекулы красителя взаимодействуют с активными группами полимера, расположенными на совершенно определенных расстояниях друг от друга. В результате получается строго упорядоченная система молекул красителя, закрепленных на поверхности полимера. Это приводит к резонансному взаимодействию в таких системах и возникновению деформаций их электронных спектров поглощения. Величина этих деформаций зависит от строения полимера и, прежде всего, от расстояния между его активными группами, которые и определяют расстояния между молекулами красителя, а, следовательно, и силу резонансного взаимодействия между ними. Все эти положения были убедительно подтверждены в работе И.В.Пеновой. Так, например, она показала, что при добавлении к разведенному раствору родамина 6Ж постепенно увеличивающихся количеств полиметакриловой кислоты происходит падение длинноволнового мономерного максимума поглощения красителя, а вместо него появляется и растет коротковолновый димерный максимум. Эти изменения совершенно аналогичны деформациям спектра поглощения этого красителя, происходящим при обычной его ассоциации в водных растворах.

Аналогичную картину удастся наблюдать и при сильном увеличении вязкости раствора, которое происходит при значительном его охлаждении и последующем замораживании. Все эти данные подтверждают справедливость высказанных выше представлений на природу межмолекулярных взаимодействий и их спектроскопических проявлений в растворах красителей.

Дальнейшее исследование межмолекулярных взаимодействий в растворах сложных органических соединений было осуществлено в кандидатских диссертациях Н.Р.Сенаторовой (1976-1979) и М.Г. Рева (1977-1980), выполненных под руководством Л.В.Лёвшина. В этих исследованиях активное участие принял доцент Б.Д. Рыжиков.

Работа Н.Р.Сенаторовой была посвящена влиянию миграции энергии возбуждения на спектральные характеристики растворов сложных органических соединений и изучению влияния неоднородного уширения электронных спектров молекул растворенного вещества на характер этого процесса. В работе были изучены концентрационные зависимости электронных спектров поглощения и люминесценции красителей ксантенового, акридинового и других рядов в различных полярных растворителях и в их бинарных смесях, а также в водных растворах с добавлением поверхностно-активных веществ. Автору впервые

удалось установить связь изменений полуширин спектров люминесценции и видимых полос спектров поглощения жидких растворов красителей с неоднородностью ближайшего окружения молекул растворенного вещества.

Показано, что причиной нарушения универсального соотношения Степанова между спектрами поглощения и люминесценции разбавленных жидких растворов сложных органических соединений при комнатной температуре является неоднородное уширение их спектров.

Установлена непосредственная связь между величиной длинноволнового концентрационного смещения спектров люминесценции красителей в растворах и неоднородным уширением их полосы поглощения. Впервые установлены основные закономерности длинноволнового концентрационного смещения спектров люминесценции жидких растворов красителей, заключающиеся в неравномерном ходе смещения максимума полосы люминесценции при изменении концентрации, уменьшении полуширины и асимметрии полосы поглощения. Доказано, что явление концентрационного длинноволнового смещения спектров люминесценции растворов сложных органических соединений обусловлено безызлучательным межмолекулярным переносом энергии возбуждения. Установлено, что среди всевозможных причин, вызывающих миграционное смещение спектров люминесценции, универсальной является неоднородное уширение электронных спектров молекул растворенного вещества.

Автором были сформулированы необходимые и достаточные условия для осуществлений миграционного смещения спектров люминесценции сложных органических соединений, заключающиеся в требовании наличия люминесцентной способности у молекул с более низким расположением уровней и определенными соотношениями между временем миграции, длительности возбужденного состояния и релаксации ближайшего окружения молекул растворенного вещества

Наконец, удалось установить, что даже в отсутствие ассоциации молекул растворенного вещества миграция энергии в условиях неоднородного уширения спектров приводит к возникновению концентрационного тушения люминесценции.

В следующей диссертационной работе М.Г. Рева решались вопросы установления природы изменений спектральных характеристик растворов сложных органических соединений при ассоциации их молекул в различных растворителях, а также выяснение причин уменьшения или отсутствия люминесцентной способности у ассоциированных молекул родамина БЖ.

Установлено, что основной причиной деформаций электронных спектров поглощения сложных органических молекул при их ассоциации является уменьшение частоты 0-0 перехода под влиянием поля близко расположенных молекул. Величина этого уменьшения значительно превосходит величину резонансного расщепления уровней. Показано, что характер изменений электронных спектров поглощения при ассоциации определяется не столько природой объединившихся молекул, сколько их взаимным расположением. Показано, что у одних и тех же молекул, в зависимости от условий опыта, можно получать деформации спектров поглощения различных типов. Наконец, были установлены причины падения люминесцентной способности молекул родамина БЖ при их ассоциации. Оказалось, что при ассоциации молекул происходит сильное уменьшение энергии активации температурного тушения люминесценции,

что приводит к развитию сильного температурного тушения ассоциированных молекул. Обнаружено влияние неоднородного уширения электронных уровней на развитие этого процесса.

В послевоенные годы на кафедре оптики были осуществлены и другие исследования в области молекулярной люминесценции. Среди этих исследований прежде всего следует отметить работу 1955 г., выполненную В.Л. Лёвшиным и его дипломником А.Г. Лактионовым. В ней с помощью малосовершенной долазерной методики экспериментально было доказано триплет-триплетное поглощение разных красителей, помещенных в сахарные леденцы. Авторам удалось в условиях того времени переводить большую часть молекул красителя из основного в возбужденное состояние. Этот процесс приводил к ослаблению основной полосы поглощения красителя и к появлению новой полосы поглощения, соответствующей поглощению возбужденных молекул, переведенных на триплетный уровень.

Интересное исследование в области хемилюминесценции люцигенина было осуществлено в 1956 г. Б.Д. Рыжиковым. Он показал, что наблюдаемый спектр хемилюминесценции этого вещества состоит из двух полос – зеленой и голубой. Однако лишь одна из них – голубая – вопреки утвердившемуся мнению принадлежит хемилюминесцентному излучению, вторая же – зеленая полоса – связана с возникновением вторичного фотолюминесцентного излучения.

В 1959 г. аспирант кафедры оптики Х.И. Мамедов выполнил под руководством В.Л. Лёвшина практически важное исследование. Перед ним была поставлена задача разработать методы люминесцентного анализа нефтей и установить природу основных компонентов, вызывающих их люминесценцию.

Исследуя узкотемпературные фракции нефтей, Х.И. Мамедов разработал ряд новых приемов их люминесцентного анализа. Для этой цели он изучил спектры люминесценции нефтей не только в видимой, но и в ультрафиолетовой частях, а также их спектры фосфоресценции, которые возникают при замораживании исследуемых объектов и оказываются столь же характерными, как и спектры флуоресценции. Кроме того, Х.И.Мамедовым была изучена зависимость спектров люминесценции нефтей от длины волны возбуждающего света, что позволило установить присутствие в них различных люминесцирующих компонентов.

Все перечисленные опыты, а также сопоставление полученных спектров со спектрами индивидуальных соединений позволили автору придти к заключению, что люминесценция нефтей в основном вызывается присутствием ароматических соединений. В дальнейшем Х.И. Мамедовым и В.Л. Лёвшиным было изучено влияние растворителя на квазилинейчатые спектры стильбена и дифенила в замороженных растворах и произведен анализ колебательной структуры этих спектров.

В последующие годы, работая в институте физики Азербайджанской АН, ставший доктором наук Х.И.Мамедов широко использовал высокочувствительную методику квазилинейчатых спектров Э.В. Шпольского для разработки оригинальных и весьма эффективных методов люминесцентного анализа нефтей.

В декабре 1969 г. кафедра оптики понесла большую утрату. В возрасте почти 73 лет из жизни ушел профессор Вадим Леонидович Лёвшин, проработавший на физическом факультете МГУ более 40 лет. Это внесло в жизнь лаборатории

люминесценции кафедры оптики немалые трудности. Осиротели дипломники и аспиранты, стал необходим пересмотр научной тематики, осталась недописанной большая научно-популярная книга.

С 1970 г. лабораторию люминесценции возглавил профессор Леонид Вадимович Лёвшин. Он всю жизнь занимался проблемами молекулярной люминесценции и не имел достаточно серьезных оснований начинать исследования рекомбинационного свечения – изучать люминесценцию кристаллофосфоров. Было решено ограничить научные интересы лаборатории молекулярной люминесценцией. В связи с этим в трудном положении оказалась лишь аспирантка В.Л.Лёвшина Н.Д.Максимова, которая завершала диссертацию по кристаллофосфорам. Л.В.Лёвшин стал ее вторым научным руководителем, желая помочь ей завершить работу. О научных результатах Н.Д.Максимовой будет рассказано ниже.

Два других аспиранта В.Л.Лёвшина В.П.Савельев и Г.И.Сергеева были еще в самом начале пути. Поэтому было признано целесообразным сменить им темы диссертации. В.П.Савельев стал изучать явление разнородной ассоциации растворов под присмотром Л.В.Лёвшина и Б.Д.Рыжикова. Однако деятельность его была мало удачной. Особого рвения к работе он не проявлял и после публикации нескольких небольших работ он покинул аспирантуру факультета.

Судьба Г.И. Сергеевой (впоследствии Романовской) сложилась более удачно, и о ее результатах будет сказано ниже.

Оставшаяся после смерти В.Л. Лёвшина неоконченной книжка «Люминесценция и ее применения», была дописана и оформлена Л.В. Лёвшиным и с двумя авторами была выпущена в свет издательством «Наука» в 1972 г. Таким образом, лаборатория люминесценции сумела преодолеть возникшие трудности и, опираясь на наказы своего учителя, успешно продолжила работу.

До сих пор основное внимание лаборатории было сосредоточено на изучении межмолекулярных взаимодействий, происходящих в растворах сложных органических соединений и, прежде всего, красителей. Вместе с тем, была очевидной необходимость сделать следующий шаг вперед и заняться изучением внутримолекулярных процессов – исследовать пути деградации энергии возбуждения внутри молекулы и, постигнув их, научиться управлять внутримолекулярной энергетикой.

Естественно, что решение этой сложнейшей задачи было невозможно без солидной экспериментальной базы, которая, к сожалению, на кафедре оптики полностью отсутствовала. Необходимо было искать какие-либо промежуточные пути, которые позволили бы получить хотя бы минимальный опыт в организации и проведении таких работ.

В 1969 г. на кафедре оптики появился сотрудник физического факультета Карагандинского университета Г.А. Кецле с просьбой принять его в аспирантуру кафедры оптики. Переговорив с ним, профессор Л.В. Лёвшин согласился первоначально взять его на годичную стажировку в свою лабораторию. Г.А. Кецле сразу проявил себя очень способным и творческим работником, всей душой преданным науке. Через год он был зачислен в аспирантуру физического факультета. Уверовав в возможности и усердие Кецле, Л.В. Лёвшин именно ему поручил проведение первых исследований в области внутримолекулярной



деградации энергии возбуждения. Известно, что внутримолекулярную энергетику можно эффективно изучать с помощью метода импульсного фотолиза (флеш-фотолиза). Разработка этого метода принадлежит английскому химику Р. Норришу, удостоенному за это достижение Нобелевской премии в 1967 г. Сущность метода состоит в том, что с помощью мощных импульсных ламп, а позднее лазерного пучка, значительная часть исследуемых молекул переводится в возбужденное триплетное состояние, после чего система просвечивается вторым менее интенсивным лучом, заставляющим переходить триплетные молекулы в свои более высокие триплетные состояния. В этом случае основная полоса синглетного поглощения ослабевает, а появляется новая полоса, характеризующая триплет-триплетные поглощения в исследуемой системе. Эти измерения обычно сопровождаются изучением длительных процессов излучения (замедленные флуоресценция и фосфоресценция).

Подобная установка была сконструирована в лаборатории канд. хим. наук А.К. Чибисова в Институте химической физики АН СССР. Контакты с Чибисовым были установлены, и он согласился принять в свою лабораторию Г.А. Кецле с тематикой, предложенной кафедрой оптики. Так возникла эта совместная работа, которая завершилась в 1973 году защитой Г.А.Кецле кандидатской диссертации в Московском университете. Значение этого события было не только в защите. Г.А.Кецле стал высококвалифицированным специалистом в этой области. Вернувшись после защиты в Караганду, он сумел на месте собрать все необходимые установки и создать небольшой, но очень продуктивно работающий молодежный коллектив. Между Карагандинским университетом и кафедрой оптики физического факультета МГУ был заключен официальный пятилетний договор, который затем неоднократно продлевался. Согласно этому договору работа обоих учреждений велась по единому плану. В Москве силами аспиранта Л.В.Лёвшина карагандинца В.В.Брюханова была собрана установка импульсного фотолиза. Лаборатория люминесценции на протяжении многих лет брала на стажировку и в аспирантуру воспитанников Карагандинского университета. Так была создана карагандинская люминесцентная школа. В Караганде велось преподавание люминесценции, готовились в области люминесценции не только студенты и кандидаты наук, но и доктора наук. В последующие годы эта школа сильно выросла, имела серьезные успехи и получила широкую известность среди специалистов в стране. Она насчитывала 6 докторов и 12 кандидатов наук. Причем все эти научные работники и педагоги прошли через лабораторию люминесценции кафедры оптики и (кроме В.В. Брюханова) защитили свои диссертации на физическом факультете МГУ.

Остановимся на основных результатах первой кандидатской диссертации этого цикла, выполненной Г.А. Кецле (1973 г.). При исследовании дезактивации синглетного возбуждения красителей обычно особое внимание уделялось изучению их люминесцентных свойств. Было установлено, что квантовые выходы излучательных и безызлучательных переходов существенно зависят от состояния красителя и окружающей среды. Известно, например, что образование ассоциатов красителей в растворах при комнатной температуре приводит к резкому падению выхода флуоресценции. Одной из гипотез, объясняющих тушение флуоресценции в таких молекулярных комплексах, является предположение о возрастающей внутренней конверсии. Однако, до сих пор не удавалось количественно оценить перераспределение вероятностей переходов в основное состояние с излучением и без излучения при замене одного растворителя на другой и при ассоциации молекул красителей, так как полностью отсутствовали данные о квантовых

выходах в триплетное состояние их мономерных и ассоциированных форм. Проведение таких измерений стало возможным лишь благодаря использованию методов импульсной спектроскопии.

В последнее время изучение триплетных состояний мономеров и ассоциатов красителей приобрело особый интерес в связи с поисками новых веществ и сред для жидкостных лазеров. Это обусловлено тем, что заселение триплетных уровней молекул красителей часто является причиной срыва или отсутствия их генерации. Диссертация Г.А. Кецле была посвящена количественному изучению процессов дезактивации электронно-возбужденных состояний мономерных и ассоциированных молекул родаминовых красителей, нашедших себе особое применение в лазерах с плавно перестраиваемой частотой генерации. Основные результаты, полученные в диссертации Г.А. Кецле, сводились к следующему. Показано, что деградация энергии синглетного возбужденного состояния ряда родаминовых красителей происходит в результате флуоресценции и внутренней конверсии, независимо от структуры их молекул.

Обнаружено и исследовано возмущающее действие внешнего тяжелого атома на молекулы родаминовых красителей. Для смесей, состоящих из 20 %  $\text{CHBr}_3$  и 80 %  $\text{C}_4\text{H}_9\text{OH}$ , определены квантовые выходы флуоресценции, внутренней конверсии и перехода в триплетные состояния этих красителей и вычислены константы скоростей излучательных переходов, а также интеркомбинационной и внутренней конверсии. Установлено, что в таких смесях увеличение вероятности переходов родаминов в триплетное состояние сопровождается не только тушением их флуоресценции, но и уменьшением вероятности внутренней конверсии. Изучено влияние полярных растворителей на процессы интерконверсии в молекулах родамина 6Ж. Показано, что протоно-акцепторные полярные растворители могут выступать в роли активных тушителей триплетных состояний красителей. На примере водных растворов родамина 6Ж показано, что дезактивация сенсibilизированно заселенных молекул красителя происходит в результате внутренней конверсии, триплет-триплетной аннигиляции и концентрационного тушения.

Изучена внутримолекулярная деградация энергии электронного возбуждения в димерах родамина 6Ж, образующихся в бинарных смесях, содержащих до 80%  $\text{CCl}_4$ . Установлено, что энергия синглетного возбуждения в димерах в основном размещается в результате внутренней конверсии ( $V_{\text{вк}} \approx 0,7$ ) и интеркомбинационных переходов в триплетные состояния ( $V_{\text{т}} \approx 0,3$ ). Оценено положение триплетных уровней димеров красителя и изучена кинетика дезактивации их триплетных состояний. Обсуждено строение димеров родамина 6Ж и связь их строения с распределением вероятностей безызлучательных переходов.

Исследована эффективность различных путей деградации энергии в сложных ассоциатах родамина 6Ж. Показано, что дезактивация синглетного возбуждения в сложных ассоциатах красителя происходит преимущественно в результате внутренней и интеркомбинационной конверсии. Квантовые выходы этих процессов равны соответственно  $V_{\text{вк}} \approx 0,73$  и  $V_{\text{т}} \approx 0,25$ . Квантовый выход флуоресценции сложных ассоциатов мал и составляет  $V_{\text{фл}} \approx 0,2$ .

Определено положение триплетных уровней сложных ассоциатов родамина 6Ж и изучена кинетика дезактивации их триплетных состояний. Предложен метод

определения численного состава сложных ассоциатов, основанный на эффективном заселении их триплетных уровней при импульсном облучении. Показано, что люминесцирующие ассоциаты родамина 6Ж состоят из 15-18 молекул красителя. Установлено, что в системах антрацен-родаминовые красители наряду с переносом энергии от донора к акцептору может осуществляться обратная передача электронного возбуждения с участием их триплетных уровней. Предложен метод определения коэффициента экстинкции триплет-триплетного поглощения. Наконец, показано, что в результате осуществления прямого и обратного переноса в системах антрацен-родаминовые красители на отдельных временных промежутках происходит выравнивание скоростей дезактивации триплетных состояний донора и акцептора. Исследование этого равновесия позволило определить отношение констант скоростей прямого и обратного переноса триплетной энергии. Установлено, что эффективность прямого и обратного переноса в таких системах определяется не только разностью энергии триплетных уровней донора и акцептора, но также зависит от потерь триплетной энергии (неактивный перенос) при диффузионных встречах молекул антрацена и красителей. Обнаруженная зависимость использована для определения положения триплетных уровней родаминов и констант скоростей активного и неактивного переноса триплетной энергии.

Исследование триплетных состояний сложных органических молекул было продолжено аспирантом Л.В.Левшина из Караганды В.В.Брюхановым (1976-1979). Целью работы являлось выяснение механизма влияния межмолекулярных взаимодействий на безызлучательные и излучательные интеркомбинационные переходы у молекул красителей в жидких растворах, находящихся в мономерной и ассоциированной формах, а также в виде ионных ассоциатов с органическими лигандами.

В работе получены следующие результаты. Обнаружено влияние структурирования водно-спиртовых растворов на безызлучательную дезактивацию триплетных состояний акридиновых и родаминовых красителей. Исследовано влияние замены молекул воды молекулами спирта в сольватных оболочках молекул красителей на процессы дезактивации их триплетных состояний. Изучено влияние сольватации атомов галогенов в водно-спиртовых смесях на усиление спин-орбитального взаимодействия в красителях. Показано, что при содержании в водном растворе свыше 60% спирта константы скорости дезактивации триплетных состояний красителей возрастают по экспоненциальному закону от концентрации спирта в смеси. Определен радиус сферы тушения внешних тяжелых атомов триплетных состояний молекул акридиновых и родаминовых красителей в жидких растворах. Обнаружена фосфоресценция у родаминов 6Ж, В, 3В, ДЭР и БРВ в жидких растворах в присутствии внешних тяжелых атомов бромформа. Определен квантовый выход и вычислено излучательное время жизни триплетных состояний и коэффициент экстинкции синглет-триплетного поглощения родамина 6Ж в пропиловом спирте, которые соответственно равны:  $\eta_{\text{фос}} = 3,6 \cdot 10^{-7}$ ,  $\eta_{\text{фос}} = 7,3$  с и  $\eta_{\text{S}} > \tau = 8,7 \cdot 10^{-5}$  м<sup>-1</sup>л см<sup>-1</sup>. Показано, что внешний тяжелый атом усиливает в молекулах красителей излучательный переход с триплетных уровней по сравнению с их безызлучательной дезактивацией. Найдено, что эффективность влияния внешнего тяжелого атома на интеркомбинационные переходы красителей в жидких растворах зависит от стерических особенностей взаимодействующих молекул и сольватирующей способности применяемого растворителя. Установлено, что скорость безызлучательной дезактивации триплетных состояний родамина 6Ж в нормальных алифатических спиртах зависит от химической

природы спирта и определяется реакцией переноса электрона с молекул спирта на триплетные молекулы красителя. Обнаружено влияние спин-орбитального взаимодействия, создаваемого внешним тяжелым атомом, на аннигиляционную замедленную флуоресценцию родамина 6Ж в спиртовых растворах. Показано, что внешние тяжелые атомы смешивают спиновые мультиплеты триплетного комплекса столкновения по механизму прямого и непрямого спин-орбитального взаимодействия. Установлено, что влияние внешнего тяжелого атома бромформа на усиление фосфоресценции родаминовых красителей зависит от структурных особенностей красителей и их способности к образованию водородной связи с молекулами бромформа. Исследована аннигиляционная замедленная флуоресценция простых ассоциатов родамина 6Ж. Предположено, что простые ассоциаты родамина 6Ж, образующиеся в смесях полярного и неполярного растворителей до 80% объема смеси неполярного компонента, можно отнести к димерам. Определен квантовый выход их флуоресценции. Предложен метод изучения структурных изменений в ассоциатах при замене состава растворителя путем исследования замедленной флуоресценции и триплет-триплетного поглощения растворов простых ассоциатов родамина 6Ж. Обнаружена и исследована замедленная флуоресценция сложных ассоциатов родамина 6Ж, образующихся в практически неполярных средах. Показано, что изменение полярного и неполярного компонент бинарной смеси эффективно влияет на перераспределение вероятностей излучательных и безызлучательных интеркомбинационных переходов в сложных ассоциатах родамина 6Ж. Полученные результаты существенно продвинули вперед существующие представления о роли и влиянии триплетных состояний на развитие процессов внутримолекулярной деградации энергии возбуждения в таких системах.

В начале 70-х годов было предпринято еще одно исследование, проводившееся на установке импульсного фотолиза Института химической физики аспиранткой проф. Л.В.Лёвшина Г.И.Сергеевой (1970-1973). В этой работе активное участие принимал хозяин установки А.К. Чибисов. Диссертация была посвящена установлению методом импульсного фотолиза механизма фотохимических превращений ионов уранила в растворах, содержащих различные органические вещества. Постановка этой работы была связана с чрезвычайной важностью урана и его соединений, а также широким практическим использованием фотохимических превращений уранила в химических актинометрах и в аналитической химии. При исследовании механизма фотохимических превращений ионов уранила основное внимание обычно уделялось изучению исходных  $U^{6+}$  и конечных  $U^{4+}$  продуктов реакции. Одной из гипотез образования  $U^{4+}$  является предположение о протекании реакции диспропорционирования  $U^{5+}$ . Однако природа электронно-возбужденного состояния  $U^{5+}$ , участвовавшего в фотохимических превращениях, была неизвестна. Более того, не удавалось экспериментально обнаружить  $U^{5+}$  и исследовать элементарные пути его гибели. В результате проведенного исследования были получены следующие результаты. Установлена синглетная природа низшего возбужденного уровня ионов уранила, ответственного за их фотохимические превращения. Впервые количественно определены спектры синглет-синглетного ( $S1^* \rightarrow S_n^*$ ) поглощения возбужденных ионов уранила и спектр поглощения  $U^{5+}$  в водных растворах. Показано, что дезактивация возбужденных ионов уранила в присутствии доноров электронов или атомов водорода (алифатические спирты) происходит в результате двух конкурирующих процессов: индуцированной внутренней конверсии ( $U^{6+}$ )\* (физическое тушение) и межмолекулярного переноса электронов (атомов водорода) от молекул тушителей с участием ( $U^{6+}$ )\* (химическое тушение).

Процессы «физического» и «химического» тушения ( $U6+$ )\* объяснены в работе исходя из предположения об образовании и дезактивации эксиплексов ионов уранила. Вычислены константы скоростей процессов «физической» и «химической» дезактивации ( $U6+$ )\* при импульсном фотовозбуждении ураниловых растворов в присутствии различных тушителей ( $U4+$ , хризоидин, алифатические спирты, карбоновые кислоты, amino- и оксипроизводные бензола и нафталина) в различных средах (1М  $H_3PO_4$ , 1М  $H_2SO_4$ , 1М  $HClO_4$ ). Оценены значения констант скоростей процесса дезактивации эксиплексов ионов уранила в присутствии алифатических спиртов в 1М  $H_3PO_4$ . Изучены элементарные фотореакции гибели  $U5+$  в 1М  $H_2SO_4$ . Установлено, что природа используемых восстановителей оказывает существенное влияние на пути превращения  $U5+$  при фотовосстановлении ионов уранила в водных растворах. Предложены экспрессные методы определения микроколичеств урана  $U6+$  без и в присутствии сопутствующих ему элементов в водных растворах. Предложен экспрессный метод определения микроколичеств некоторых органических веществ (анилин, ?-нафтиламин, дифениламин, фенол, ?-нафтол, гидрохинон) в водных растворах. Таким образом, проведенное исследование дало возможность не только установить природу важных фотохимических процессов, получающих развитие в растворах уранила, но широко использовать полученные результаты в аналитических целях.

Главу о работах лаборатории люминесценции кафедры оптики в области молекулярной люминесценции следует завершить кратким рассказом об очень плодотворном, более чем двадцатилетнем сотрудничестве с кафедрой аналитической химии химического факультета МГУ, возглавляемой академиком И.П.Алимариным, который в 1966 году выступил инициатором этого творческого союза. Непосредственные исследования проф. Л.В.Лёвшин проводил совместно с доцентом кафедры аналитической химии А.П.Головиной. Академик И.П.Алимарин ушел из жизни в 1988 году. Сотрудничество между кафедрами продолжалось еще несколько лет. За это время Л.В. Лёвшиным совместно с А.П.Головиной было подготовлено три кандидата химических наук (Ю.А.Митцель – 1969 г., С.Н.Сапежинская – 1982 г. и Н.Ю.Кузякова – 1985 г.). Под их руководством был также выполнен ряд дипломных работ и опубликовано в печати около 30 научных работ. В работах исследовались люминесцентно-спектроскопические свойства различных красителей, которые широко использовались в аналитических целях (определение галлия, скандия и других элементов).

Основываясь на многолетнем опыте совместной работы. А.П.Головина и Л.В.Лёвшин написали учебное пособие «Химический люминесцентный анализ неорганических веществ», которое издательство «Химия» выпустило в свет в 1978 году. Книга пропагандировала широкое использование люминесцентных методов исследования в аналитической практике. Она оказала большую пользу химикам-аналитикам, работающим в исследовательских и производственных лабораториях. Она также стала важным учебным пособием для преподавателей, аспирантов и студентов химических специальностей университетов и других высших учебных заведений.

### **3.3. Люминесценция кристаллофосфоров**

В предвоенные годы исследования под руководством В.Л.Лёвшина в области люминесценции в Московском университете велись широким фронтом и охватывали изучение как молекулярного, так и рекомбинационного свечения. Такая же тенденция сохранилась и в послевоенные годы. Исследования свечения

кристаллофосфоров в МГУ были начаты проф. В.Л.Лёвшиным в конце 40-х годов. По существу, он был единственным человеком в нашей стране, который с успехом одновременно занимался столь различными по природе видами люминесценции на протяжении всей своей жизни.

Под руководством В.Л.Лёвшина кристаллофосфорные исследования велись по нескольким направлениям. Первое направление было посвящено изучению влияния кристаллической решетки на люминесцентные свойства кристаллофосфоров и выяснению природы центров их свечения. Важные результаты здесь были получены в кандидатской диссертации Л.Дрозд (Польша) в 1957-1960 гг. В ней было изучено влияние состава смешанных неактивированных ZnS•CdS кристаллофосфоров на спектры люминесценции и другие характеристики их свечения. Оказалось, что у таких фосфоров существует три разных полосы излучения, каждая из которых развивается в определенном интервале температур и при соответствующем соотношении компонентов основного вещества решетки. Полученные результаты позволили приписать каждую из этих полос определенному центру свечения кристаллофосфоров.

Аналогичным вопросам были посвящены работы аспирантки С.Г. Кройтору (1960-1964), которая изучала слоистые фосфоры типа CdI<sub>2</sub>•PbI<sub>2</sub> не только в виде порошков, но и фосфоры аналогичного состава, полученные в виде сублимированных пленок. Преимущество последних заключается в том, что они не вызывают рассеяния проходящего через них света, а это позволяет изучать их спектр поглощения и оценить долю поглощенного ими возбуждающего света. Таким образом удалось установить природу центров свечения у кристаллофосфоров этого типа.

В связи с большим интересом к смешанным ZnS•CdS-фосфорам, которые начали использоваться в качестве активного вещества в лазерных системах, В.Л.Лёвшин совместно с аспиранткой М.В.Сенашенко (1963-1970) продолжил изучение природы центров их свечения. В этих работах было изучено большое количество как самоактивированных, так и активированных медью, серебром, марганцем и редкими землями ZnS•CdS-люминофоров. В результате авторы оценили влияние изменений постоянной кристаллической решетки фосфора на их центры свечения.

Для выяснения природы люминесценции фосфоров на основе щелочноземельных сульфидов была исследована электронная структура кристаллов их оснований. Эти работы проводил под руководством В.Л.Лёвшина В.В.Михайлин (с 1956) с группой стажеров и дипломников. Исследование оптических свойств сульфидов в области фундаментального поглощения, расположенного в вакуумной ультрафиолетовой области, потребовало создания сложной спектральной аппаратуры и сублимационных установок для получения пленок основания и сублиматфосфоров. В результате было установлено, что сложная структура спектра за краем поглощения обусловлена экситонными и межзонными переходами. Из анализа полученных экспериментальных данных и теоретических расчетов была предложена структура соединений типа АП-BVI.

Исследования возбуждения люминесценции в области фундаментальной полосы поглощения от 5 до 75 эВ показало, что в этой области энергий, превышающей удвоенную ширину запрещенной зоны, квантовый выход люминесценции резко возрастает и наблюдается фотонное умножение. Это позволяет определить эффективность ламповых люминофоров для рентгеновских экранов в области

больших энергий. Впоследствии для возбуждения люминесценции и исследования оптических характеристик кристаллов в работах кафедры широко использовалось синхротронное излучение ускорителя ФИАН на 680 МэВ.

К первому же направлению примыкают также диссертационные работы аспиранток Р.К.Пиринчиевой (Болгария) (1962-1966) и Н.Д. Максимовой (1964-1970), в которых были изучены спектры люминесценции чистых и смешанных кристаллов  $Y_2O_3$ ,  $In_2O_3$  и  $Sc_2O_3$ , активированных ионами редкоземельных элементов  $Eu^{3+}$ ,  $Tu^{3+}$ ,  $Tb^{3+}$  и  $Dy^{3+}$ . В этих работах были изучены температурные и концентрационные зависимости интенсивностей и ширины линий излучения и произведена детальная расшифровка спектров люминесценции этих практически важных кристаллофосфоров.

Вторым направлением в области изучения свечения кристаллофосфоров явились исследования, посвященные выяснению природы очень важного явления трибогашения люминесценции. Известно, что для нанесения кристаллофосфоров на люминесцентные экраны и на стенки люминесцентных ламп необходим растертый, мелкодисперсный порошок. Однако при растирании выход свечения кристаллофосфоров резко уменьшается (явление трибогашения) и, следовательно, существенно сокращаются возможности их практического использования.

Хронологически первое исследование в этом направлении на кафедре было выполнено студенткой-дипломницей И.В.Вейц под руководством В.Л.Лёвшина еще в 1949 г. Оказалось, что наблюдаемое тушение необходимо прежде всего связывать с изменениями в структуре кристаллической решетки кристаллофосфоров. Подробно природу трибогашения исследовал в своей диссертации Б.Д.Рыжиков (1964), который изучил изменения оптических свойств цинксульфидных фосфоров при уменьшении линейных размеров как неподвергавшихся изменению кристаллофосфоров, так и мелкодисперсных кристаллов, полученных при их раздроблении. Эти опыты показали, что явление трибогашения сложно и вызывается развитием внешнего и внутреннего тушения. Последнее вносит основной вклад в наблюдаемый эффект. Однако при очень больших степенях раздробления главную роль начинает играть сильное увеличение рассеяния света на мелкодисперсном порошке.

Третье важное направление исследования свечения кристаллофосфоров было посвящено изучению их уровней локализации и порядку заполнения их электронами. Эти процессы имеют первостепенное значение для понимания кинетики свечения кристаллофосфоров. Для их решения обычно используют метод кривых термического высвечивания, при котором возбужденный и замороженный кристаллофосфор подвергается постепенному нагреванию. При этом происходит последовательное высвобождение электронов с его уровней локализации различной глубины.

На кафедре оптики впервые эту методику осуществила аспирантка В.Л.Лёвшина Н.В.Жукова (1953) при исследовании аккумуляционной способности и происхождения уровней локализации электронов у цинкосульфидных фосфоров. Ей удалось выяснить происхождение и расположение уровней локализации у фосфоров этого типа, а также установить порядок их заполнения электронами в зависимости от температуры и других факторов. В дальнейшем метод кривых термического высвечивания использовался в работах В.Л.Лёвшина, Б.Д.Рыжикова и др. Он превратился в один из основных методов изучения свечения

кристаллофосфоров. На кафедре оптики получил развитие и еще один метод изучения уровней локализации электронов у кристаллофосфоров – метод экзоэлектронной эмиссии. Он состоит в постепенном нагревании предварительно возбужденного замороженного фосфора. Однако о наличии у него уровней локализации здесь судят по электронной эмиссии с поверхности фосфора. Аспирант П.А.Пипинис (Литва) (1962) под руководством В.Л.Лёвшина впервые в нашей стране создал высокочувствительную установку, позволяющую изучать электронную эмиссию с поверхности кристаллофосфоров в высоком вакууме. С ее помощью был изучен ряд щелочногалогенидных, щелочноземельных и цинксульфидных фосфоров. Было показано, что, как правило, наблюдаются существенные различия между кривыми термовысвечивания и экзоэлектронной эмиссии. Особенности последних связаны с тем, что у кристаллофосфоров уровни локализации в поверхностных слоях, изучаемых экзоэлектронной эмиссией, расположены иначе, чем в объеме кристалла.

В диссертации аспиранта В.Л.Лёвшина В.А.Горюнова (1966) были изучены уровни локализации кристаллофосфоров третьим методом, основанным на измерении проводимости предварительно возбужденных кристаллофосфоров при постепенном их нагревании. Здесь также при определенных температурах происходит высвобождение электронов с мест их локализации. Появление термически освобожденных электронов и приводит к изменению проводимости исследуемого кристаллофосфора.

Четвертым важным направлением исследования свечения кристаллофосфоров было изучение явления оптической вспышки. Сущность его состоит в том, что высвобождение электронов с уровней локализации может происходить не только при нагревании фосфора, но и при его облучении лучами оптического диапазона частот и, прежде всего, коротковолновой ИК-радиацией.

В конце сороковых годов в ФИАНе под руководством В.Л.Лёвшина было осуществлено исследование оптической вспышки, за что В.Л.Лёвшину и группе его сотрудников в 1952 г. была присуждена Сталинская премия. В дальнейшем под его руководством эти работы были продолжены на кафедре оптики физического факультета МГУ. В диссертационной работе его аспиранта Б.М.Орлова (1964) было изучено явление оптической вспышки у ZnS:Cu,Pb-фосфоров под действием инфракрасных лучей различных длин волн. Проведенные опыты показали, что для освобождения электронов с уровней локализации оптическим путем требуется их предварительная тепловая активация. При этом величина энергии активации определяется природой соответствующего уровня локализации. Параллельно с оптической вспышкой было изучено и явление оптического тушения свечения. Оказалось, что оно также требует для своего развития предварительной тепловой активации.

Работы по оптической вспышке продолжил В.В.Михайлин, который изучил эффект расширения длинноволновой границы чувствительности оптической вспышки у щелочноземельных и некоторых цинксульфидных кристаллофосфоров при низких температурах. Полученные результаты позволили ему сделать выводы о природе эффекта и возможности его практических применений. В работе был использован метод сопоставления температурной релаксации вспышки с ходом кривых термического высвечивания. На созданной В.В.Михайлиным установке в дальнейшем был освоен современный метод дифференциального термовысвечивания. В работах В.В.Низовцева, А.В.Ефименко и других этим



методом была исследована тонкая структура центров захвата у различных кристаллофосфоров.

Интересные свойства оптической вспышки обнаружил В.А.Горюнов, который исследовал ее замораживание у цинксulfидных фосфоров. Опыты показали, что здесь происходит перераспределение возбужденных электронов по уровням локализации кристаллофосфора. Таким образом, удалось объяснить явление замораживания оптической вспышки. Используемая методика позволила проследить и за изменением числа повторных захватов электронов при их высвобождении с уровней локализации.

#### **4. Молекулярная спектроскопия**

Исследования по молекулярной спектроскопии на кафедре оптики до до своей кончины в 1965 г. возглавлял проф. П.А.Бажулин. Начиная с 1939 г. П.А.Бажулин развивал на физическом факультете МГУ оптические методы исследования распространения ультразвуковых волн в жидкостях и газах, которые позволили изучать релаксационные процессы возбуждения внутренних степеней свободы молекул при прохождении через вещество ультразвуковых колебаний. П.А.Бажулин изучал затухание ультразвука в некоторых жидкостях с помощью наблюдения дифракции света на ультразвуке. Вернувшись после войны в университет, он взял себе в аспиранты выходца из Туркмении А.А.Бердыева, которому поручил продолжить свои прежние исследования. В 1951 г. А.А.Бердыев успешно защитил кандидатскую диссертацию на тему «Поглощение ультраакустических волн в жидкостях». Дальнейшая судьба А.А.Бердыева сложилась очень удачно. Вернувшись в Туркмению, он развил свою тематику, получив важные результаты в оптике, молекулярной физике и акустике. После защиты докторской диссертации он был избран академиком АН Туркменской ССР, а затем и ее вице-президентом, стал директором Физико-технического института АН Туркменской ССР (1969), ее вице-президентом (1967-1975) и профессором Туркменского университета в Ашхабаде.

После защиты А.А.Бердыевым диссертации П.А.Бажулин более не возвращался к ультразвуковой тематике. Под его руководством проводились исследования строения вещества и межмолекулярного взаимодействия по спектрам комбинационного рассеяния света и инфракрасного поглощения. Особое внимание было уделено методическим разработкам и усовершенствованию спектральной аппаратуры. Это позволило повысить точность измерения спектральных характеристик и получить ряд качественно новых результатов.

С помощью фотоэлектрического метода аспирант П.А.Бажулина Н.И.Резаев впервые исследовал контуры линий комбинационного рассеяния света в жидком состоянии вещества. Его измерения показали, что форма линий близка к дисперсионному распределению интенсивности. Кроме того, была исследована температурная зависимость ширины линий комбинационного рассеяния света и установлено влияние хаотического движения молекул в жидкости на деполаризацию их линий комбинационного рассеяния света. Основываясь на этой зависимости, удалось определить время хаотической переориентации молекул в ряде жидкостей. В работах бажулинских аспирантов Ю.А.Лазарева (1959-1962) и Ф. Пинтера (Венгрия) (1960-1965) прецизионная методика фотоэлектрической регистрации была впервые применена для исследования контуров линий в спектрах комбинационного рассеяния света в газах при низких давлениях.

Особо следует подчеркнуть сложность таких исследований из-за малой интенсивности линий комбинационного рассеяния света. Эти трудности были успешно преодолены и для некоторых простых веществ, таких как кислород, углекислый газ и некоторых других, были исследованы контуры линий чисто вращательного спектра, а также контуры вращательно-колебательных полос. На основании зависимости ширины вращательных линий от давления были определены эффективные оптические поперечники молекул. Форма контуров вращательно-колебательных полос была объяснена взаимодействием колебания с вращением.

Аспирант-заочник П.А.Бажулина Ю.П.Егоров (1953-1957) исследовал колебательные спектры кремний-органических соединений методами инфракрасного поглощения и комбинационного рассеяния света и установил влияние положения кремния в ряду родственных соединений на параметры их колебательного спектра. Аспирант-теоретик П.А.Бажулина Ф.А.Савин (1957-1959) рассчитал интенсивность и степень деполяризации линий комбинационного рассеяния света некоторых соединений с сопряженными двойными связями и показал преобладающее значение  $\pi$ -электронов для комбинационного рассеяния света. Все расчеты проводились на основе металлической модели молекулы. Вычисленные значения для интенсивностей и деполяризации линий рассеяния света некоторых полиеновых и ароматических соединений хорошо согласуются с экспериментальными данными. Много новых результатов было получено на кафедре при изучении инфракрасных полос поглощения. Тщательно разработанная методика позволила аспиранту П.А.Бажулина В.Н.Смирнову (1960-1962) получить важные данные о зависимости абсолютных интенсивностей и ширины инфракрасных полос поглощения от агрегатного состояния вещества, природы растворителя и температуры. Во всех этих случаях было установлено существенное влияние межмолекулярного взаимодействия на параметры ИК-полос. Оказалось, что различные колебания одной и той же молекулы могут по-разному реагировать на возникновение межмолекулярного взаимодействия. В своей диссертации бажулинский аспирант А.В.Чекунов (1961-1964) исследовал влияние межмолекулярного взаимодействия на основные параметры инфракрасного спектра. Им было изучено влияние образования водородных связей и комплексов с переносом зарядов на частоту, интенсивность и ширину инфракрасных полос поглощения пиридина и некоторых других ароматических соединений.

Использование прецизионной методики для исследования колебательных спектров в работах П.А. Бажулина и его учеников дало много нового для теории рассеяния и поглощения света и для развития молекулярного спектрального анализа.

В середине пятидесятых годов под руководством доцента А.А. Бабушкина (1909-1968) была начата разработка спектроскопических методов исследования строения молекул, адсорбированных на поверхности твердых адсорбентов. Первоначально была отработана методика изучения этого процесса на окислах, существующих в виде порошков, которые из-за большого рассеяния света непрозрачны в ИК-области. Благодаря полученным результатам в дальнейшем удалось перейти к адсорбции и на других практически важных объектах, а разработанная А.А. Бабушкиным методика позволила продвинуться в область основных колебательных частот. Поэтому стало возможным наблюдать не только образование водородных связей с поверхностными ОН-группами адсорбентов, но и

изменение всех связей при взаимодействии молекул с поверхностью твердого адсорбента.

Проведенные исследования показали, что с помощью инфракрасных спектров удается различать:

- 1) слабую физическую адсорбцию, характеризующуюся небольшими изменениями в спектре адсорбированных молекул;
  - 2) образование водородных связей по сильному сдвигу полосы валентных ОН-колебаний в сторону меньших частот и значительному ее уширению;
  - 3) возникновение химических связей между молекулой и твердым адсорбентом по появлению новых полос в ИК-спектре.
- Такая большая чувствительность ИК-спектров дает возможность раскрыть природу адсорбции, что имеет важное теоретическое и практическое значение, так как это явление используется во многих областях техники и промышленности.

Наряду с изучением новых свойств, которые приобретает молекула в состоянии адсорбции на поверхности твердого адсорбента, проводилось изучение поверхности катализаторов – его активных кислотных центров, на которых разыгрываются те или иные химические превращения. Это представляет большой интерес как для понимания процесса катализа, так и для управления каталитическими реакциями.

Долгое время считалось, что протонными кислотными центрами окисных катализаторов являются их поверхностные ОН-группы. Л.А. Игнатьева показала отсутствие прямой корреляции между кислотностью ОН-групп и каталитической активностью катализаторов. Это указывало на то, что ОН-группы поверхности окисных катализаторов не являются теми активными центрами, которые ответственны за катализ. В диссертационной работе Г.Д. Чукина (1966-1968), выполненной под руководством Ф.А. Королева и Л.А. Игнатьевой, с помощью метода ИК-спектроскопии были изучены активные центры алюмосиликатного катализатора крекинга, а также окислов, входящих в его состав. В качестве «спектрального зонда» кислотных центров использовалась молекула пиридина. Было показано, что протонные центры возникают на поверхности дегидратированного катализатора при адсорбции на нем молекул воды. Из анализа спектральных данных следует, что протонными центрами являются молекулы воды, координационно связанные с валентно-ненасыщенными атомами кремния. Образование донорно-акцепторной связи молекул воды и поверхностных атомов кремния приводит к тому, что обычная молекула воды становится очень сильной кислотой за счет сильной протонизации ее атомов водорода.

В дальнейшем (1965) Л.А. Игнатьева перешла в лабораторию молекулярной люминесценции и спектроскопии к проф. Л.В. Лёвшину и под их совместным руководством были выполнены две кандидатские диссертации, тесно примыкающие к описанной выше тематике.

В первой из них А.И. Бучневой (1968-1970) была разработана методика изучения активных центров катализаторов по спектрам люминесценции, с использованием в качестве «спектрального зонда» молекул акридина, подробно изученного в ранних работах Л.В. Лёвшина. Этот метод, подобно ИК-спектроскопии, позволяет дифференцировать кислотные центры на протонные и апротонные, но превышает последний по чувствительности на два-три порядка. Вторая диссертация Л.В. Ефименко (1972-1974) была посвящена изучению свойств искусственных

цеолитов, обладающих высокой каталитической активностью, во много превышающей активность применяемых в промышленности катализаторов. Наиболее перспективны цеолиты, используемые в качестве катализаторов в процессах нефтепереработки и нефтехимического синтеза, а также при их применении в качестве адсорбентов при глубокой очистке и сушке различных газов. Однако их эффективное использование невозможно без глубокого изучения их активных центров.

Промышленные катализаторы на основе цеолитов представляют собой матрицу из окиси алюминия с добавкой 10-20% цеолита. Поэтому весьма важно знать поведение и взаимное влияние цеолитов и матрицы. Решение этой сложнейшей задачи следовало начинать с отдельного изучения структуры и поверхностных свойств цеолитов и окиси алюминия. Большой перспективностью в проведении такого рода исследований обладает метод инфракрасной спектроскопии, которым и воспользовалась диссертантка.

В результате детального исследования Л.В.Ефименко удалось глубоко разобраться в структуре цеолитов, выявить у них активные центры и определить характер их взаимодействия.

Установлено, что компенсирующие катионы в цеолитах являются электронно-акцепторными центрами, сила которых зависит от величины электростатического поля катионов. Доказано существование компенсирующих катионов алюминия ( $Al^{3+}$ ) в глубоко декатионированных цеолитах. Установлено большое количество разнообразных ОН-групп в цеолитах NaX и NaY. Показано, что на поверхности  $\gamma$ - $Al_2O_3$  существует три типа ОН-групп, два типа "активных" атомов кислорода, мостиков Al-O-Al, обладающих электронно-донорными свойствами, а трехкоординационные атомы алюминия являются электронно-акцепторными центрами. Выявлен также ряд других особенностей рассматриваемых систем. В результате была предложена модель протоно-донорных центров  $\gamma$ - $Al_2O_3$ . Согласно этой модели молекулы воды взаимодействуют с трехкоординационными атомами алюминия по донорно-акцепторному механизму и участвуют в образовании водородной связи одной своей ОН-группой с "активными" атомами кислорода.

Далее работы в области молекулярной люминесценции и молекулярной спектроскопии были продолжены уже вне рамок кафедры оптики – на кафедре общей физики физического факультета МГУ, куда обе лаборатории были вынуждены перейти ввиду сложной обстановки, сложившейся вокруг их работы.

## 5. Лазеры

Успехи кафедры оптики в исследованиях по лазерной тематике в значительной степени были обеспечены первоклассными мастерскими кафедры: механической, оптической, химической, стеклодувной, и лабораторией по многослойным диэлектрическим покрытиям, которые давали возможность быстрого создания и запуска лазерных установок.

Обзор результатов работ по лазерной тематике, приведенный ниже, составлен по материалам докторских диссертаций сотрудников кафедры: Короленко П.В. "Оптико-физические процессы в пространственно-неоднородных лазерных системах", 1994; Лебедева В.В. "Экспериментальные методы оптики и спектроскопии в исследованиях физики газоразрядных лазеров", 1996; Одинцов

А.И. “Процессы нелинейного усиления и генерации излучения в многоуровневых, неоднородных и движущихся средах газовых лазеров”, 1999; Наний О.Е. “Высокостабильные многоканальные твердотельные лазеры”, 1999; Одинцов В.И. “Эффективное обращение волнового фронта в оптических системах с обратной связью”, 2003, и большого числа кандидатских диссертаций и дипломных работ, выполненных на кафедре.

### 5.1. Работы по газовым лазерам

**Гелий-неоновый лазер.** После появления в научной печати в 1961 г. сообщения о создании газового лазера Ф.А. Королев поручил студенту-дипломнику Розанову А.Г. сделать лазер на смеси гелия и неона. Тогда же появилось первое сообщение о том, что для газовых лазеров с небольшим усилением, каким был He-Ne лазер, необходимо использовать вогнутые зеркала. Вогнутые подложки были изготовлены в оптической мастерской кафедры, на них были нанесены диэлектрические зеркальные покрытия с высоким коэффициентом отражения, и в конце декабря 1962 г. впервые в МГУ генерация He-Ne лазера на длине волны 1,15 мкм была получена.

В следующем году, в 1963-м, отпаянная модель He-Ne лазера, генерирующего на красной линии с длиной волны 0,63 мкм, разработанная студентом-дипломником Мицаем В.Н., демонстрировалась на Выставке достижений народного хозяйства СССР и была удостоена серебряной медали.

С 1963 г. на кафедре проводились разносторонние исследования физических характеристик He-Ne лазеров. Было изучено влияние параметров разряда и резонатора на генерацию лазера, что позволило определять оптимальные условия работы лазера.

**Ионный аргоновый лазер.** С 1965 г. велись работы по исследованию лазеров на ионах аргона. Основное направление этих исследований – изучение взаимодействия активной среды и светового поля внутри резонатора лазера. Предварительно по ширине спектральных линий ArII, излучаемых полым катодом при предельно малых давлениях и плотностях тока, были найдены времена жизни нижних для генерации уровней ArII, оказавшиеся равными 0,01 сек, что в 5 раз меньше существовавших тогда теоретических значений. Это внесло ясность в понимание механизма генерации ArII лазера. Далее были теоретически рассчитаны и измерены характеристики насыщения трех основных линий генерации ArII лазера. Результаты работы показали, что на зеленой линии 514,5 нм при низких потерях в резонаторе возможно получение мощности, сравнимой с мощностью синей линии 488 нм. Исследована динамика модового состава излучения ArII лазера на линии 488 нм с разверткой во времени при разрешении до 0,1 пикосек. Обнаружено, что генерация непрерывного ArII лазера представляет собой хаотическую картину вспышек на отдельных продольных модах, конкурирующих между собой, с расстоянием между ними, равным однородной ширине линии, и характерной длительностью каждой вспышки порядка 0,1 пикосек. Это явление характерно и для He-Ne лазера с большой длиной резонатора (дипломники Сауткин В.А., 1967 г., Салимов В.М., 1967 г.).

В 1966 г. создан ArII лазер, стабильно генерирующий на одной частоте, и изучены его характеристики. В 1968 г. в содружестве с НПО “Исток” получена рекордная на то время мощность одночастотной генерации ArII лазера на длине волны 488 нм,

В серии работ, выполненных в 1967-1971 гг., были изучены характеристики насыщения лазерных переходов в многочастотном и одночастотном режимах генерации и определены параметры насыщения основных переходов. Полученные данные о населенностях лазерных уровней, скоростях накачки и вероятностях распада, о роли процессов ступенчатого возбуждения и дезактивации уровней способствовали пониманию механизма работы ArII лазера. Исследовался и ряд других нелинейных явлений. Так, впервые наблюдалось явление нелинейного фарадеевского вращения плоскости поляризации света в газах.

В 1978 г. на кафедре была получена генерация на смеси Ar и Kr, три основные линии которой (синяя ArII 488 нм, зеленая ArII 514,5 нм и красная KrII 647,1 нм) в сумме вызывают ощущение белого света. Для этого лазера в лаборатории многослойных покрытий кафедры были сделаны двойные диэлектрические зеркала – первое зеркало предназначалось для отражения синей и зеленой областей спектра, второе, нанесенное поверх первого, отражало красную область спектра. Отражение такого зеркала было близко к 100% во всей видимой области спектра и лазер генерировал белый луч. В настоящее время белые Ar-Kr лазеры применяются в лазерных проекторах. Получаемая с ними бесконечная глубина резкости и высокая яркость позволяют проецировать изображение на фасады больших зданий, таких, как, например, главное здание Московского университета на Ленинских горах, и другие неровные поверхности.

В 1982-1989 гг. проводились исследования обращения волнового фронта при четырехволновом смешении в активной среде одночастотного непрерывного Ar лазера на линии ArII 488 нм (асп. Быкова Н.Г.). Теоретические оценки показали, что, несмотря на сравнительно слабое усиление в ArII лазере, составляющее порядка  $10^{-2} \text{ см}^{-1}$ , наблюдение обращения волнового фронта вполне возможно. Коэффициент отражения при обращении волнового фронта, измеренный экспериментально, составлял  $2 \cdot 10^{-4}$ .

Развитые методы исследований генерации ArII лазера использовались в 1983-1986 гг. для изучения нелинейного взаимодействия в плазме ArII лазера методом трехуровневой лазерной спектроскопии (Быкова Н.Г.). Экспериментально и расчетным путем было показано, что, когда один из переходов системы представляет собой сильное поле, а второй, сканируемый по частоте, служит пробным, в условиях доплеровского уширения линий ArII, составляющего 4000 МГц, возможно получение и исследование спектральных структур с шириной 100 МГц, что в 5 раз меньше естественной ширины этих линий ArII (500 МГц). Методами нелинейной лазерной спектроскопии с использованием трехуровневых систем изучено зеэмановское расщепление уровней ArII, штарковское уширение линий в аргонной плазме.

**Гелий-кадмиевый лазер.** Проведены комплексные исследования активной среды He-Cd лазера, генерирующего на длине волны CdII 441,6 нм, с целью выяснения физических механизмов ограничения и спада мощности генерации при больших токах разряда (асп. Феофилактова Т.В., 1974-1977 гг.). Измерены важнейшие лазерные параметры среды (населенности уровней, скорости накачки и распада, параметр насыщения) в широком диапазоне изменений условий разряда (сила тока, давление, концентрация паров кадмия). Основная информация была получена из измерений характеристик насыщения усиления и с помощью методов, основанных

на влиянии генерации на интенсивность спонтанного излучения. Для нахождения параметров плазмы разряда (концентрации электронов и метастабильных атомов гелия, электронной температуры) использовались зондовые и интерферометрические методы. При обработке экспериментальных данных учитывалась радиальная неоднородность пучка и лазерной среды. На основании анализа экспериментальных данных и выполненных по ним расчетов сделан вывод о том, что процесс дезактивации верхнего лазерного уровня электронами, наряду с насыщением концентрации метастабильных атомов He, является основной причиной спада мощности генерации лазера при больших плотностях тока. Результаты исследований дали достаточно полную картину процессов, протекающих в He-Cd<sup>+</sup> лазере и определяющих его генерационные характеристики.

**Газоразрядный CO<sub>2</sub>-лазер.** В режиме стационарной генерации типового CO<sub>2</sub>-лазера исследовано распределение насыщенных коэффициентов усиления колебательно-вращательных линий CO<sub>2</sub> путем просвечивания активной среды излучением перестраиваемого зондирующего CO<sub>2</sub>-лазера. Получены данные о населенностях колебательных уровней, о колебательной и газовой температурах активной среды в отсутствие и при наличии генерации. Определены скорости накачки и распада верхних и нижних колебательных уровней и величины параметров насыщения для переходов с длинами волн 9,4 и 10,4 мкм. Полученные результаты позволили сделать выводы о процессах в активной среде – о роли диффузии колебательно-возбужденных молекул, о влиянии частичной диссоциации CO<sub>2</sub> в разряде, а также ряд других выводов.

**Газодинамический CO<sub>2</sub>-лазер.** Экспериментальные исследования характеристик насыщения в CO<sub>2</sub>-ГДЛ на длине волны 10,6 мкм проведены с целью проверки полученных теоретических соотношений и опробования предложенных методов диагностики потока, основанных на явлениях насыщения. Результаты измерений мощности генерации, параметров насыщения, оптимального пропускания зеркал, оптимальной длины съема энергии и др. подтвердили корректность принятой теоретической модели. Весьма информативным было измерение “остаточного” коэффициента усиления на выходе потока из резонатора, что характеризовало величину выносимой из резонатора колебательной энергии.

Большой цикл работ посвящен CO<sub>2</sub>-ГДЛ на связанных колебательных модах молекулы CO<sub>2</sub> с инертными газами с длинами волн генерации более 10 мкм. Экспериментальное осуществление этого лазера связано с трудностями, поскольку для получения инверсии требуется охлаждение газа до криогенных температур (50-100 К), которая может быть достигнута в сверхзвуковом сопле с большой степенью расширения.

Активная среда CO<sub>2</sub>-ГДЛ на связанных модах представляет собой многоуровневую молекулярную систему с чрезвычайно высокой колебательной неравновесностью, находящуюся к тому же в сильно пересыщенном состоянии (температура газа в потоке намного ниже равновесной температуры конденсации CO<sub>2</sub>). По сравнению с традиционным CO<sub>2</sub> лазером на длине волны 10,6 мкм данный лазер имеет гораздо более сложный механизм образования инверсии, в который вовлечено порядка 100 колебательных уровней и большое число различных элементарных процессов. Это не позволяет использовать для расчетов CO<sub>2</sub>-ГДЛ на связанных модах модели, описывающие работу традиционного CO<sub>2</sub>-ГДЛ.

Исследования генерации на связанных модах проводились на лабораторном образце СО<sub>2</sub>-ГДЛ, ранее использованном для исследования генерации на 10,6 мкм, однако в нем была увеличена степень расширения потока с целью более глубокого охлаждения газа. Помимо известного перехода с длиной волны 18,4 мкм в данных экспериментах обнаружено еще 8 новых лазерных колебательных переходов в области длин волн 16,4-21,2 мкм. При оптимизации параметров лазера возможно увеличение числа генерируемых колебательно-вращательных линий вплоть до почти полного перекрытия линиями генерации всего интервала спектра от 16,4 до 21,2 мкм, т.е. создание в этом диапазоне спектра перестраиваемого по частоте лазера.

Проведенные экспериментальные и теоретические исследования СО<sub>2</sub>-ГДЛ на связанных модах показали, что по своим удельным энергетическим характеристикам (на единицу расхода газа) СО<sub>2</sub>-ГДЛ на связанных модах сравнимы с СО<sub>2</sub>-ГДЛ на 10,6 мкм. Однако свойственные СО<sub>2</sub>-ГДЛ высокие абсолютные мощности в данном лазере не достигаются из-за низкой плотности потока при относительно малых величинах расхода газа. Проведены теоретические исследования и модельные расчеты, показывающие возможность осуществления с помощью предложенных методов автомодуляционных режимов генерации в лазерах с движущейся активной средой и непрерывным возбуждением, в том числе в газодинамических и быстропротекающих СО<sub>2</sub> и СО-лазерах. Автомодуляционный режим генерации достигается ценой относительно небольшого снижения средней мощности генерации и позволяет получить высокие пиковые мощности при частоте повторений импульсов до десятков кГц. Такого рода режимы могут представлять значительный интерес, в частности, для лазерной технологии. Предложенные способы не требуют применения импульсно-периодических источников возбуждения разряда и каких-либо модулирующих элементов. Они позволяют путем изменения параметров резонаторной системы или пространственной конфигурации разряда вблизи оси неустойчивого резонатора варьировать временные характеристики импульсов, а также получать непрерывный режим генерации.

**Суперлюминесцентные газовые лазеры.** Лазеры на самоограниченных переходах (нижний уровень такого перехода является метастабильным, поэтому при его заселении генерация самопроизвольно прекращается) благодаря очень высокому коэффициенту усиления дают мощное излучение (суперлюминесценцию) в отсутствие резонатора. Проблема формирования когерентности суперлюминесценции (СЛ) в нелинейной усиливающей среде без резонатора имеет фундаментальный характер. Начиная с 1969 г. аспирантами (Байков С.С., Абросимов Г.В., Якунин В.П.) и студентами кафедры выполнены комплексные исследования свойств СЛ в различных образцах СЛ-лазеров (переходы в Ne, N<sub>2</sub>, Cu, Tl, Pb), а также в непрерывном He-Ne лазере на линии Ne  $\lambda = 3,39$  мкм. Исследовались спектральный (модовый) состав линий СЛ, временная и пространственная когерентность СЛ, поляризационные характеристики и статистические свойства СЛ. Задачей исследований было изучение условий формирования когерентных свойств СЛ в усиливающей среде лазера. Применялись как традиционные оптические методы, так и сравнительно недавно разработанные в физике лазеров, например, поляризационный интерферометр для измерений пространственных корреляционных функций поля. Результаты исследований показали, что в отношении пространственной когерентности излучение СЛ-газоразрядных лазеров занимает промежуточное место между излучением тепловых источников и полностью когерентным излучением одномодового лазера.



При определенных условиях в канале СЛ-лазера из шумового спонтанного излучения на его входе формируется СЛ с высокой степенью когерентности.

В отличие от генерации в резонаторе формирование спектра СЛ и ее свойств происходит в самой активной среде в результате нелинейного взаимодействия среды с распространяющимся через нее излучением. Как наблюдалось на линиях Tl, Pb и др., при этом происходит расщепление спектральной линии СЛ, что свидетельствует об общем характере этого явления. Максимальное число компонент расщепления наблюдалось на линии Ne 614,3 нм и достигало 10. Среднее расстояние между компонентами определялось обратной длительностью импульса. Положения компонент в разных импульсах не воспроизводились, поэтому регистрация спектра с наложением серии импульсов давала гладкую форму линии. Это свидетельствовало о флуктуационном происхождении модовой структуры СЛ, что подтверждено и расчетами.

Программа исследований когерентных свойств СЛ включала также исследования поляризационных характеристик излучения. Обнаружена поляризация СЛ, обусловленная анизотропией усиления среды, которая возникает вследствие зеемановского расщепления уровней атомов в собственном магнитном поле возбуждающего разряда. Экспериментальные исследования были выполнены на шести переходах Ne и в парах Pb. Теоретически решена задача формирования поля СЛ в анизотропном активном канале и расчета дифракционных мод такого канала. Амплитудно-фазовые и поляризационные характеристики поля излучения анизотропных мод изменяются от точки к точке в сечении пучка, образуя сложные двумерные распределения, содержащие информацию о свойствах усиливающей среды. Развитая теория анизотропных мод СЛ удовлетворительно описывает наблюдаемые характеристики поля.

## 5.2. Работы по твердотельным лазерам

**Рубиновый лазер.** Первый рубиновый лазер (694,3 нм) на кафедре создан А.И. Акимовым в 1963 г. Рубиновый кристалл был приобретен в институте Кристаллографии, а импульсные ксеноновые лампы для накачки лазера – на Московском электроламповом заводе в лаборатории Маршака, где тогда изготавливались только U-образные лампы. Такие лампы были очень неудобны, однако рубиновый лазер удалось сделать. Это был один из первых лазеров на факультете. На кафедру приезжали журналисты из кинохроники и из журналов “Техника молодежи” и “Юный техник” и фотографировали его действие. Выпускник кафедры Г.И. Кромский, работавший в это время в Африке, в Мали, видел в кинохронике эти кадры.

С первым образцом рубинового лазера А.И. Акимовым были поставлены лекционные демонстрации действия мощного лазерного излучения на материалы и лазерного пробоя воздуха – лазерная искра. Тогда же был разработан и изготовлен измеритель энергии излучения рубинового лазера, один из вариантов которого используется до настоящего времени. Была освоена техника получения мощных ультрафиолетовых импульсов второй гармоники рубинового лазера, которые в дальнейшем стали применяться для изучения лазеров на органических красителях.

Совместно с НИИ Механики МГУ (лаборатория с.н.с. Миркина Л.И.) проводилось изучение воздействия мощных импульсов рубинового лазера на различные металлы, полимерные материалы, стекла и некоторые кристаллы. Обнаружена

корреляция результатов воздействия (размеры и вид разрушения) с физическими свойствами вещества и порядковым номером химического элемента в периодической системе. Впервые были обнаружены специфические виды разрушений, наблюдаемых в полимерных образцах при воздействии мощных импульсов свободной генерации рубинового лазера, изучены результаты воздействия гигантских импульсов, получаемых в режиме модуляции добротности лазера, наблюдалось также явление самофокусировки луча в полимерных средах.

В последующие годы были выполнены различные исследования с применением рубинового лазера. Исследовались возможности повышения энергии излучения с помощью лазерного усилителя. При двухкаскадной схеме усиления было получено четырехкратное увеличение энергии лазерного излучения. Изучались возможности повышения КПД и энергии излучения рубинового лазера путем использования люминесцентных трансформаторов, преобразующих ультрафиолетовое излучение ламп накачки в видимое. Получено существенное увеличение КПД рубинового лазера. Исследовались условия применения неустойчивого резонатора с целью получения одномодового режима генерации рубинового лазера, пригодного для получения голографических изображений.

Проводилось изучение возможностей получения голографических изображений с помощью непрерывного гелий-неонового лазера небольшой мощности в условиях помещений с большим уровнем шумов и вибраций. В результате была разработана и построена оригинальная лазерная установка, позволившая получать даже в таких неблагоприятных условиях устойчивые голографические изображения с помощью маломощного гелий-неонового лазера. Были получены в отраженном свете гелий-неонового лазера голограммы предметов небольших размеров, образцы голографической дифракционной решетки.

В дальнейшем рубиновый лазер использовался как источник накачки для возбуждения генерации органических красителей. Были изучены лазерные генерационные свойства ряда новых синтезированных соединений, в том числе из класса пирилиевых солей.

## **6. Нелинейная оптика**

При большой интенсивности световой волны зависимость наведенной поляризации среды от напряженности светового поля уже не может считаться линейной. Нелинейность поляризации приводит к целому ряду нелинейных оптических эффектов, таких как генерация гармоник, самофокусировка света, вынужденное рассеяние и другие. Самый первый нелинейный эффект – уменьшение коэффициента поглощения при большой интенсивности света («просветление среды») – наблюдался в 1923 г. С.И.Вавиловым и В.Л.Лёвшиным.

Современный этап развития нелинейной оптики начался в 1961 г. после создания мощных лазеров. В 1964 г. на кафедре оптики по инициативе проф. П.А.Бажулина были начаты исследования вынужденного комбинационного рассеяния света (ВКР). Несколько ранее им были развернуты такие же работы в ФИАНе. Надо сказать, что сразу после открытия ВКР (1962 г.) исследования этого явления приняли широкий размах ввиду возможности его практического применения для преобразования частоты лазерного излучения.

Поскольку основной специалист по комбинационному рассеянию на кафедре м.н.с.

Н.И.Резаев должен был на длительный срок уехать на работу в Бирму, для развития нового направления исследований был привлечен ассистент (с 1971 г. с.н.с.) В.И.Одинцов, который ранее комбинационным рассеянием не занимался. Последнее, впрочем, не имело существенного значения, поскольку вынужденное рассеяние требовало других теоретических подходов и совсем другой экспериментальной техники – лазеры мегаваттной мощности как источники возбуждающего излучения, фотоприемники наносекундного диапазона, скоростные осциллографы и др.

В освоении новой аппаратуры и экспериментальной методики активно участвовали пришедшие в лабораторию молодые сотрудники – З.А.Баскакова и Т.С.Захарова (Коннова). Дружеская помощь была оказана работавшим в ФИАНе выпускником кафедры В.А.Зубовым и сотрудниками кафедры волновых процессов Г.В.Венкиным, Т.М. Ильиновой и другими. Внимание к новой работе проявлял и заведующий кафедрой волновых процессов, впоследствии академик и ректор МГУ Р.В. Хохлов.

После безвременной кончины П.А.Бажулина в октябре 1965 г. его лаборатория отошла под общее начало заведующего кафедрой оптики проф. Ф.А.Королева.

Экспериментальные исследования начались с изучения энергетических и временных характеристик ВКР в разных средах и при разных условиях возбуждения. Наряду с ВКР изучался и другой нелинейный эффект – вынужденное рассеяние Мандельштама-Бриллюэна (ВРМБ), часто сопутствующее ВКР ввиду более низкого порога возбуждения. Надо отметить, что из-за высокой пороговой интенсивности накачки изучение вынужденного рассеяния в чистом виде может затрудняться самофокусировкой лазерного пучка, а также возникновением кавитации и светового пробоя среды. Поэтому большое внимание было уделено изучению влияния этих эффектов, и прежде всего – изучению влияния самофокусировки накачки на характеристики ВКР и ВРМБ. По результатам проведенных исследований был опубликован ряд научных статей и защищена кандидатская диссертация аспирантом из Румынии Г. Сингурелом (1969).

В этот же период м.н.с. З.А.Баскаковой были проведены опыты по модуляции добротности лазерного резонатора с помощью ВРМБ-кюветы и показано, что при этом достигается значительное увеличение энергии лазерного импульса. В этих экспериментах возбуждающее излучение состояло из лазерной компоненты и нескольких компонент последовательного ВРМБ, усиленных в активной среде лазера, и имело, таким образом, широкий спектр. Поэтому они свидетельствовали об эффективности широкополосного возбуждения ВРМБ.

В аспирантской работе Е.Ю.Соколовой было изучено возбуждение ВКР в сжатых газах с применением оптических резонаторов. Резонатор позволяет значительно снизить пороговую мощность накачки и существенно улучшить временную и пространственную когерентность стоксовой компоненты. Выбор сжатых газов был обусловлен высокой однородностью газовой среды и значительно меньшим, чем в жидкости, возмущением ее интенсивным лазерным излучением. Исследованы пороги возбуждения, временная задержка стокова импульса, а также структура и ширина спектральных линий ВКР. Показано, что возбуждение ВКР в конфокальном резонаторе, помещаемом внутри лазерного резонатора, на несколько порядков снижает пороговую мощность лазера и позволяет осуществлять преобразование частоты лазеров невысокой мощности, в частности, твердотельных

лазеров, работающих в режиме свободной генерации.

Аспирантом из Афганистана М.Б.Табиби под руководством Н.И. Резаева было изучено возбуждение ВКР в смесях органических жидкостей, что позволило выявить влияние межмолекулярного взаимодействия на процесс ВКР. Во второй половине 60-х годов по инициативе В.И.Одинцова были начаты исследования резонансных нелинейных процессов в парах щелочных металлов. При подходе к резонансу происходит быстрое снижение порога возбуждения и рост эффективности нелинейных процессов. Пары щелочных металлов, обладающие узкими линиями переходов и большими значениями сил осцилляторов, наиболее удобны для таких исследований. Однако для подхода к резонансу нужна была перестройка частоты накачки, а использовавшиеся для изучения нелинейных эффектов твердотельные лазеры такой возможности не предоставляли. Прорыв в экспериментальном исследовании резонансных нелинейных процессов был осуществлен в аспирантской работе С.А. Бахрамова, который впервые использовал в качестве источников накачки созданные в 1966 г. лазеры на красителях, допускавшие перестройку частоты генерации. Исследование резонансных нелинейных процессов в условиях перестройки частоты возбуждающего излучения позволило получить целый ряд приоритетных результатов. Впервые была исследована частотная зависимость порога электронного резонансного ВКР, изучены четырехфотонные резонансные параметрические процессы и вынужденное излучение с заселяемых верхних уровней.

Эти работы и последующие исследования резонансных нелинейных процессов на кафедре оптики получили высокую оценку одного из основоположников нелинейной оптики проф. С.А.Ахманова. Впоследствии С.А.Бахрамов продолжил исследования резонансных нелинейных процессов в Отделе теплофизики АН Узб.ССР и защитил по ним докторскую диссертацию.

Большой цикл работ, проводившийся до конца 80-х годов, был посвящен получению мощного ИК-излучения при резонансном возбуждении паров щелочных металлов лазерами на красителях с перестраиваемой частотой. В них в разное время принимали участие аспирант из Египта А.О.Фахми, аспиранты В.А.Михайлов, Т.С. Бимагамбетов, аспирант, а впоследствии м.н.с. Н.В.Знаменский, студенты-дипломники В.В.Мартынов, М.Г.Пискарев и другие. Было изучено перестраиваемое по частоте ИК-ВКР, а также возбуждение ИК-излучения при четырехфотонных параметрических процессах и при заселении верхних уровней атома, в том числе и путем оптико-столкновительных переходов.

Результаты исследований по резонансным процессам, а также по ВКР в оптических резонаторах использовались при создании эффективных преобразователей излучения лазеров на органических соединениях с ламповой накачкой. Эта работа в течение ряда лет проводилась в рамках хоздоговора с НИИ "Зенит" (г. Зеленоград) и курировалась выпускником кафедры В.И.Атрощенко. В этом же институте работали Г.И.Кромский, А.И.Сопин и ряд других выпускников кафедры.

Излучение мощных лазеров, использующихся для возбуждения вынужденного рассеяния, характеризуется обычно большим числом поперечных мод, а его спектральная ширина может значительно превышать ширину линии перехода среды. Это делает актуальным изучение особенностей вынужденного рассеяния в поле пространственно-неоднородной и широкополосной накачки. Интерес к изучению нелинейного взаимодействия пространственно-неоднородных световых

полей, как монохроматических, так и широкополосных, значительно возрос после открытия в 1972 году явления обращения волнового фронта (ОВФ) при ВРМБ, выражающегося в корреляции пространственных структур накачки и возбуждающейся волны.

На кафедре оптики работы в этом направлении проводились с конца 60-х и до начала 80-х годов. В теоретических исследованиях В.И. Одинцова был развит единый спектральный подход в теории нелинейного взаимодействия пространственно-неоднородных и широкополосных световых пучков, основанный на представлении возбуждающейся волны в виде суперпозиции парциальных полей, коррелированных с полем накачки. Показано, что в условиях широкого углового или частотного спектров накачки отдельные парциальные поля возбуждаются независимо друг от друга, что позволяет легко осуществить их расчет. В когерентном режиме рассеяния, сопровождающемся обращением или воспроизведением волнового фронта накачки, спектр возбуждающейся волны в общем случае характеризуется не “жесткой”, а лишь парциальной сфазированностью со спектром накачки, вследствие чего имеют место медленные временные и крупномасштабные пространственные флуктуации поля стоксовой волны. Указанные эффекты представляются как результат интерференции парциальных полей. Особенности вынужденного рассеяния в поле накачки с широким угловым (или частотным) спектром трактуются как результат параметрического взаимодействия угловых (или частотных) компонент накачки и возбуждающейся волны. Выявлена глубокая аналогия в теоретическом описании этих двух случаев на базе спектрального подхода. В частности, установлено существование критической яркости пространственно-неоднородной накачки, являющейся аналогом критической спектральной плотности широкополосной накачки, введенной в работе С.А.Ахманова, Ю.Е.Дьякова и А.С.Чиркина (1971 г.). Показано, что при превышении этих критических значений происходит подстройка фаз компонент углового (или частотного) спектра возбуждающейся волны, поддерживающая эффективность параметрического взаимодействия в условиях угловой (или частотной) волновой расстройки.

Была разработана спектральная теория возбуждения вынужденного рассеяния в поле накачки с широким угловым (или частотным) спектром, учитывающая корреляцию спектральных компонент спонтанного шума и накачки. Она позволила, в частности, решить вопрос о соотношении интенсивностей рассеяния вперед и назад. Создана теория усиления вынужденного рассеяния, в которой поле усиленной стоксовой волны рассчитывается в зависимости от корреляции входного сигнала и накачки. Осуществлено обобщение метода парциальных полей на случай широкополосной пространственно-неоднородной накачки, как пространственно-когерентной, так и пространственно-некогерентной. Важную роль в разработке теории играли численные расчеты, проводившиеся м.н.с. З.А.Баскаковой, аспиранткой (впоследствии м.н.с.) О.М.Вохник и аспиранткой Е.Г.Тренивой.

Первые экспериментальные исследования ВРМБ с широкополосной накачкой в виде дискретных спектральных компонент с интервалами, определяемыми частотным сдвигом обратного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна, были выполнены З.А.Баскаковой и вошли в ее кандидатскую диссертацию, защищенную в марте 1973 г. На заседании Ученого Совета выступил В.В.Рагульский, незадолго перед этим экспериментально обнаруживший явление ОВФ при ВРМБ. Его интересовало, почему вопреки распространенным представлениям широкополосное возбуждение ВРМБ оказывается эффективным. После защиты

состоялся его разговор с В.И.Одинцовым, разъяснившим, что дело заключается в неучитывавшемся ранее параметрическом взаимодействии спектральных компонент. Интересно, что уже через год В.В.Рагульский сам использовал широкополосную накачку в опытах по ОВФ при ВРМБ.

Экспериментальные исследования ВКР и ВРМБ в режиме усиления входного сигнала на стоксовой частоте были проведены аспиранткой, а впоследствии сотрудницей кафедры О.М.Вохник. При широкополосной накачке было установлено существование эффекта задержки усиления и исследована зависимость инкремента усиления от степени корреляции входного сигнала и накачки.

В экспериментах с пространственно-неоднородной накачкой было показано, что в соответствии с теорией угловое распределение стоксовой компоненты ВКР кардинально изменяется при превышении критической яркости накачки и приближается к угловому распределению возбуждающего пучка. Если одномодовый входной сигнал несколько отличается по направлению от пучка накачки, то в процессе усиления из-за параметрического возбуждения новых стоксовых волн он отклоняется от своего первоначального направления и распространяется вдоль возбуждающего пучка.

Параметрическое возбуждение новых стоксовых волн было количественно изучено в специальном эксперименте по усилению исходной стоксовой волны в поле двух пересекающихся одномодовых лазерных пучков. Другой “модельный” эксперимент по возбуждению ВКР в резонаторе с двумя пересекающимися одномодовыми пучками накачки дал возможность измерить увеличение коэффициента усиления, обусловленное эффектом параметрического взаимодействия волн.

Действие широкополосной накачки при возбуждении ВКР вблизи резонанса впервые было изучено в аспирантской работе В.А.Михайлова. Исследования проводились в парах щелочных металлов как в видимой, так и в ИК-области спектра. Было получено хорошее согласие экспериментальных и расчетных значений критической спектральной плотности накачки. В этой же диссертационной работе наряду с ВКР было изучено резонансное вынужденное трехфотонное рассеяние света, а также влияние на эти процессы высокочастотного эффекта Штарка. К сожалению, работу по резонансному ВКР с пространственно-неоднородной накачкой ввиду больших технических трудностей завершить не удалось, несмотря на очень квалифицированную и напряженную работу асп. В.В.Мартынова.

Проводившиеся на кафедре исследования вынужденного рассеяния с пространственно-неоднородной накачкой тесно соприкасались с актуальной проблемой обращения и воспроизведения волнового фронта и вызывали значительный интерес у специалистов в этой области. Так, на состоявшейся в 1978 г. в Ленинграде IX-й конференции по когерентной и нелинейной оптике, посвященной памяти академика Р.В. Хохлова, после окончания заседания в зале состоялась продолжительная дискуссия с большим числом участников, на которой В.И.Одинцову пришлось отвечать на вопросы по сделанному им докладу, во время которого, кстати, какие-то люди фотографировали из зала все, появлявшееся на экране. Со стороны большой группы участников атаке подвергся вывод спектральной теории, что при возбуждении высших парциальных полей спектр

стоксовой волны повторяет лишь достаточно крупные детали углового спектра накачки. Ведь из него автоматически вытекало, что поперечное пространственное распределение стоксовой волны должно повторять только достаточно мелкие детали пространственного распределения накачки, испытывая одновременно крупномасштабные пространственные флуктуации. Между тем во всех теоретических работах по обращению и воспроизведению волнового фронта, опубликованных к тому времени, говорилось только о точном повторении рассеянной волной пространственной структуры накачки. Подробно объяснив детали расчета, В.И.Одинцов провел аналогию со случаем широкополосной накачки, в котором огибающая стоксовой волны, повторяя быстрые флуктуации огибающей накачки, испытывает еще и медленные временные флуктуации. По поступившим из ФИАНа сведениям, о состоявшейся дискуссии было сообщено Б.Я.Зельдовичу, одному из создателей теории ОВФ. В вышедшей из печати через два года статье он рассмотрел крупномасштабные пространственные флуктуации на основе координатного подхода.

Экспериментально медленные временные флуктуации при ВРМБ с одномодовой широкополосной накачкой впервые были исследованы О.М. Вохник (1981 г.). В проведении измерений принимала участие студентка-дипломница О.В.Салецкая. Было установлено, что характерное время флуктуаций определяется шириной спектра возбуждающейся в среде фоновой волны.

Представляло интерес экспериментально изучить медленные флуктуации и при пространственно-неоднородной широкополосной накачке, чтобы выявить их влияние на пространственную когерентность стоксовой волны. Такие работы были проведены в аспирантской работе Е.Г.Трениной. Показано, что в режимах обращения и воспроизведения волнового фронта в случае узких пучков накачки, когда крупномасштабная структура не проявляется, медленные флуктуации совершаются синхронно по всему сечению пучка, и поле стоксовой волны при пространственно-когерентной накачке также пространственно-когерентно. При ВРМБ в условиях ОВФ широких пучков накачки была обнаружена и изучена крупномасштабная структура на волновом фронте стоксовой волны.

С начала 80-х годов кафедральная лаборатория нелинейной оптики почти полностью переключилась на исследование ОВФ, главным образом, на разработку и экспериментальную проверку новых перспективных методов ОВФ.

ОВФ проявляется в разнообразных нелинейных оптических процессах, поскольку их эффективность, как правило, зависит от пространственной корреляции взаимодействующих световых полей. Обращенная волна имеет те же поверхности волнового фронта и то же пространственное распределение интенсивности, что и исходная волна, но распространяется в противоположном направлении. При прохождении по среде с неоднородностями показателя преломления в обращенной волне происходит компенсация фазовых искажений и восстановление первоначальной формы волнового фронта исходной волны. Это свойство обращенной волны лежит в основе большинства практических применений ОВФ, таких, как получение высоконаправленного лазерного излучения при использовании неоднородных активных сред, самонаведение лазерных пучков и лазерная локация, оптическая связь и передача изображений при наличии атмосферных искажений, лазерная интерферометрия и многих других. Ко времени развертывания на кафедре работ по ОВФ (1982 г.) широко применялись только два метода обращения – самообращение при вынужденном рассеянии и ОВФ

сигнальной волны при четырехволновом взаимодействии (ЧВВ) с использованием двух встречных опорных волн. Существенным недостатком первого метода является высокая пороговая мощность накачки, что затрудняет его использование для лазеров средней и малой мощности. Значительным неудобством при осуществлении метода ОВФ-ЧВВ является необходимость создания интенсивных опорных волн, которые должны быть или плоскими, или взаимно сопряженными. Чтобы избежать искажения плоских опорных волн, необходима высокая однородность нелинейной среды во всем объеме взаимодействия. Принципиальную трудность представляют неустойчивость и искажение плоских встречных волн в нелинейной среде. Для расширения сферы практического применения ОВФ было актуальным создание таких методов ОВФ, которые, с одной стороны, обладали бы значительно более низким порогом ОВФ, чем метод самообращения, а с другой – не были связаны с необходимостью использования опорных волн. В основу решения этой задачи была положена новая идея возбуждения обращенной волны в режиме генерации с обратной связью, предложенная и разработанная В.И. Одинцовым.

Актуальным представлялось и использование для ОВФ резонансных сред, которые характеризуются большими значениями нелинейной восприимчивости и не требуют высокой интенсивности накачки. Поскольку ряд важных классов лазеров, таких, как лазеры на красителях, полупроводниковые лазеры, лазер на окиси углерода, имеют широкую линию генерации, актуальной была разработка методов ОВФ излучения с большой шириной спектра.

В этой работе общее руководство и проведение теоретических исследований осуществлял В.И.Одинцов. Экспериментальные исследования и численные расчеты проводились аспирантами Л.Ф. Рогачевой, С.В.Рязановым и Д.А.Николаевым, а также выпускниками кафедры кандидатами физ.-мат.наук Е.Ю.Соколовой и А.Н.Пономаревым.

В 1982 г. В.И.Одинцовым и Л.Ф.Рогачевой был предложен и экспериментально реализован метод ОВФ при генерации вынужденного рассеяния в самопересекающемся лазерном пучке в режиме параметрической обратной связи. Осуществлен новый принцип создания обратной связи за счет параметрически возбуждаемой стоксовой волны. Для “параметрического резонатора”, в отличие от обычного, не возникает трудностей с вводом излучения накачки, а его частотная настройка сводится к грубой установке его длины. Предложенный метод не требует создания внешних опорных волн. Он позволяет более чем на порядок снизить пороговую мощность накачки и может использоваться для ОВФ излучения лазеров невысокой мощности. Из-за наличия петли обратной связи он получил в литературе название “петлевой схемы ОВФ”. Различные модификации петлевых схем были изучены В.И.Одинцовым, Д.А.Николаевым и А.Н.Пономаревым.

Работы по петлевым схемам ОВФ на кафедре оптики повлекли за собой большое количество публикаций других авторов и в значительной степени определили развитие этой тематики в нашей стране и за рубежом. Они получили высокую оценку ведущих специалистов в области ОВФ. Так, Б.Я.Зельдович в своем выступлении на I-й Всесоюзной конференции по ОВФ (г. Минск, 1986 г.) уделил большое внимание этим работам, подчеркнув их приоритетный характер.

Несмотря на перспективу значительного снижения порога возбуждения, вопрос об использовании оптических резонаторов для генерации обращенной волны долгое



время не ставился. Лишь в 1985 г. в работе В.И.Одинцова и Л.Ф.Рогачевой было показано, что ОВФ лазерной накачки может быть получено при использовании вырожденного резонатора. Обычный резонатор не подходит для целей ОВФ, поскольку поле внутри него отличается по пространственной конфигурации от поля падающего пучка. В вырожденном же резонаторе резонансные частоты всех поперечных мод совпадают, вследствие чего при выполнении частотной настройки в нем может резонировать поле любой пространственной конфигурации, что и позволяет использовать такой резонатор с нелинейной средой для ОВФ падающего на него светового пучка.

Снижение порога ОВФ при использовании вырожденного резонатора составляет несколько порядков и обусловлено двумя факторами – малыми потерями в нем для обращенной волны и “накоплением” возбуждающего излучения внутри резонатора. Оно позволяет использовать вырожденный резонатор для ОВФ излучения малой мощности. Для этой же цели можно использовать также вырожденный резонатор с насыщающимся красителем и усиливающей средой (В.И.Одинцов, Д.А.Николаев, 1993 г.).

В 1988 г. В.И.Одинцовым и С.В.Рязановым впервые наблюдалось ОВФ с низким порогом возбуждения при релаксационном вынужденном резонансном рассеянии, характеризующимся малым частотным смещением. В качестве нелинейной среды использовались пары рубидия в смеси с тушащим буферным газом (азот). Дальнейшее снижение порога приблизительно на порядок было достигнуто в петлевых схемах, работавших с той же нелинейной средой. На 2-й Всесоюзной конференции по ОВФ (Минск, 1989) эта работа получила высокую оценку Б.Я. Зельдовича. В своем выступлении он отметил также в целом высокий уровень исследований по ОВФ, проводящихся на кафедре оптики физического факультета МГУ.

Как отмечалось выше, ОВФ имеет широкие перспективы практического применения в направленной оптической связи, лазерной локации и других задачах, связанных с наведением лазерного излучения на удаленные объекты и компенсацией фазовых искажений на трассе светового пучка. Ввиду малой интенсивности идущей от удаленного объекта сигнальной волны необходимо, чтобы используемый метод ОВФ характеризовался низким порогом возбуждения и большим коэффициентом ОВФ-отражения сигнальной волны. Далее, из-за доплеровского смещения частоты сигнальной волны, обусловленного движением объекта, он должен допускать вариацию частоты этой волны. Этим требованиям удовлетворяют схемы ОВФ, основанные на параметрической генерации ВРМБ в системе многократных пересечений пучков накачки и сигнальной волны, разработанные в 1992 г. В.И. Одинцовым, А.Н.Пономаревым и Е.Ю.Соколовой. Отношение интенсивностей сигнальной волны и накачки может составлять ~10–8 при коэффициенте ОВФ-отражения ~106.

При большой ширине спектра излучения получение обращенной волны как при “классическом” ЧВВ с опорными волнами, так и в петлевых схемах ОВФ затрудняется непараллельностью тонких слоев когерентности пересекающихся световых пучков, приводящей к ограничению области когерентного взаимодействия. В 1994г. В.И.Одинцовым и Е.Ю.Соколовой был предложен метод диспергированных световых пучков, позволяющий решить проблему ОВФ излучения с большой шириной спектра. Суть метода заключается в наклоне слоев когерентности путем внесения дисперсии в световые пучки, что позволяет

совместить слои когерентности пересекающихся под небольшим углом пучков и распространить тем самым область их когерентного взаимодействия на все поперечное сечение независимо от ширины спектра. Аналогичный способ расширения области когерентного взаимодействия был разработан и для широкополосных сфокусированных пучков. Показано, что внесение продольной дисперсии позволяет совместить сферические слои когерентности пучков с разным положением точек фокусировки. Исследованы когерентные свойства продольно-диспергированных световых пучков. Показано, что такие пучки могут быть использованы для осуществления аксиально-симметричных петлевых схем (В.И.Одинцов, 2004), а также для получения ахроматических интерференционных колец. В целом, метод диспергированных световых пучков может найти применение и в других областях нелинейной оптики, а также в голографии. Например, он может использоваться для наложения друг на друга сверхкоротких импульсов в пересекающихся световых пучках большого диаметра.

Работы по когерентному взаимодействию диспергированных световых пучков получили высокую оценку чл.-корр. РАН Б.Я. Зельдовича. По этому научному направлению В.И.Одинцову были выделены гранты Международного научного фонда (фонда Сороса), а также правительства Российской Федерации.

Большой цикл работ В.И.Одинцова по исследованию нелинейного взаимодействия пространственно-неоднородных и широкополосных световых полей и созданию новых эффективных методов ОВФ в оптических системах с обратной связью был обобщен им в докторской диссертации, защищенной в 2003 г. Параллельно с разработкой новых методов ОВФ в лаборатории интенсивно велись и другие исследования, связанные с изучением и практическим применением этого явления. Так, ряд работ был посвящен изучению параметрической неустойчивости при вынужденном рассеянии, в том числе и в резонансных условиях (В.И.Одинцов, Л.Ф.Рогачева, С.В. Рязанов, Е.Ю.Соколова). Были проанализированы возможности когерентного ОВФ излучения газодинамического СО-лазера (В.И. Одинцов, В.Г.Макаров, 1999). Значительный интерес представляют исследования ОВФ в петлевых схемах с использованием фоторефрактивных нелинейных сред, выполненные О.М.Вохник в содружестве с Отделом лазерных кристаллов ИОФАН. Большой цикл исследований О.М.Вохник, продолжающийся и в настоящее время, связан с созданием обращающих волновой фронт зеркал для уникальных по своим характеристикам твердотельных лазеров с новыми активными средами, разрабатываемых в ИОФАН. В этой работе принимала участие асп. И.В.Терентьева, защитившая под руководством О.М.Вохник кандидатскую диссертацию в 1998 г.

## **7. Другие направления оптических исследований**

### **7.1. Исследования по синхротронному излучению**

Электромагнитное излучение электронов при движении по круговым орбитам в кольцевых ускорителях (синхротронное излучение) было предсказано советскими физиками Д.Д.Иваненко и И.Я.Померанчуком в 1944 году. Теория этого явления была развита в трудах Д.Д.Иваненко, А.А.Соколова, И.М.Тернова, А.А.Арцимовича, И.Я.Померанчука и др.

Систематические экспериментальные исследования синхротронного излучения на кафедре оптики были начаты под руководством Ф.А.Королева в 1954 г. Работы

проводились в тесном контакте с группой теоретиков А.А.Соколова, Д.Д.Иваненко, И.М.Тернова, а также совместно с лабораториями Физического института АН им. П.Н.Лебедева – лабораторией фотомезонных процессов под руководством лауреата Нобелевской премии П.А.Черенкова и лабораторией частиц высоких энергий, руководимой лауреатом Ленинской премии В.А.Петуховым.

В этих исследованиях принимали участие ученики Ф.А. Королева – Е.М.Акимов, О.Ф.Куликов, В.С.Марков, Б.И.Шкурский, А.Г.Ершов, А.С. Яров. В результате всестороннего изучения синхротронного излучения на электронных кольцевых ускорителях ФИАН С-25 с энергией 270 МэВ и С-60 с энергией 660 МэВ была экспериментально подтверждена классическая теория этого излучения, развитая в трудах Д.Д.Иваненко, А.А.Соколова, И.М.Тернова и др., был открыт эффект квантового возбуждения собственных колебаний электронов, предсказанный А.А.Соколовым и И.М.Терновым, а также эффект радиационного затухания свободных колебаний электронов в ускорителях, предсказанный в работах А.А. Коломенского и А.Н.Лебедева.

Впервые подробно исследованы угловое распределение и поляризация синхротронного излучения электронов вплоть до энергий 650 МэВ (О.Ф.Куликов, А.С.Яров). На базе синхротронов ФИАН разработан оптический метод исследования электронного сгустка в ускорителях. Впервые установлены законы изменения амплитуд радиальных и аксиальных бетатронных колебаний электронов в ускорителях. Разработан метод возбуждения резонансов бетатронных колебаний в синхротроне. Впервые обнаружены и исследованы важнейшие резонансы, учет которых позволил значительно уменьшить потери частиц в процессе ускорения.

Впервые в мире проведены эксперименты по столкновению встречных светового лазерного пучка и пучка электронов в ускорителе (О.Ф.Куликов). Обнаружен обратный комптон-эффект, выражающийся в превращении световых фотонов в  $\gamma$ -кванты. Исследовано угловое распределение и энергетический спектр гамма-квантов, возникающих в результате комптоновского рассеяния на электронах с энергией 550 МэВ.

В 1967 г. сотрудники кафедры создали первый в стране вакуумный ультрафиолетовый спектроскопический канал на синхротроне ФИАН С-60. С тех пор кафедра последовательно ведет научные исследования по комплексному изучению механизмов возбуждения люминесценции и других вторичных процессов, возникающих в веществе под действием синхротронного излучения. Кафедра имеет два канала на новом источнике синхротронного излучения в Курчатовском институте: 1. канал для ВУФ-спектроскопии на малом накопителе электронов и 2. канал для исследования люминесценции при рентгеновском возбуждении на большом накопителе (в декабре 2002 г. на этом канале получены первые физические результаты на рентгеновском источнике синхротронного излучения – накопителе электронов на 2,5 ГэВ Курчатовского института).

В 1971 г. за теоретическое и экспериментальное исследование синхротронного излучения Ф.А.Королев, О.Ф.Куликов, А.А.Соколов и И.М.Тернов были удостоены Ломоносовской премии МГУ. В 2001 г. Ломоносовская премия была присуждена В.В.Михайлину, А.Н.Васильеву и И.А.Каменских за применение синхротронного излучения в спектроскопии.

С 1969 г. ведутся совместные исследования по люминесценции и спектроскопии

твердого тела с Немецким электронным синхротроном ДЭЗИ (Гамбург). По этой программе в Гамбурге работают многие научные сотрудники, аспиранты и студенты кафедр.

Кафедра возглавляет учебно-научный центр (УНЦ) “Синхротронное излучение”, включающий МГУ, Российский научный центр “Курчатовский институт” и Институт физики твердого тела РАН.

## **7.2. Оптика лазеров (оптико-физические процессы в лазерных резонаторах и передающих средах)**

Работы по исследованию процессов формирования пространственно- временной структуры излучения в резонаторах лазеров и изучению особенностей распространения лазерных пучков в оптических системах и передающих средах были развернуты сразу после создания на кафедре первых лазеров (1964 г.). Организационное оформление эти работы получили в результате создания в 1965 г. по инициативе профессора Королева Ф.А. лаборатории когерентной оптики.

В проводимых лабораторией исследованиях активное участие приняли сотрудники кафедры: Васильев А.Б., Гринь Л.Е., Зотов А.М., Короленко П.В., Лебедева В.В., Маганова М.С., Макаров В.Г., Мушенков А.В., Одинцов А.И., Спажакин В.А., Федосеев А.И., Якунин В.П.

Особенно крупный вклад в постановку исследований и руководство их ходом внес доктор физ-мат. наук, доцент Одинцов А.И. Им была создана теория нелинейного насыщения усиления в многоуровневых внутрирезонаторных средах с учетом их движения и диффузии частиц, а также разработана физическая модель процессов длинноволновой генерации в резонаторе газодинамического СО<sub>2</sub>-лазера. Руководимая им группа впервые провела исследование пространственной структуры, спектрального состава и поляризационных свойств излучения суперлюминесцентных лазеров на самоограниченных переходах газов и паров металлов, подробно проанализировала явления оптической неустойчивости и условия возникновения автомодуляции при движении лазерно-активной среды. Полученные фундаментальные результаты позволили решить ряд важных прикладных задач. Среди последних следует отметить разработанные схемы оптимизации параметров молекулярных лазеров, расширение спектрального состава их генерации, разработку методов управления светодинамическими характеристиками.

Важная серия исследований была выполнена А.И.Одинцовым и В.В. Лебедевой. В активной среде аргонового лазера ими было впервые получено обращение волнового фронта излучения с широким спектральным распределением. Экспериментально и расчетным путем было продемонстрировано существование новых возможностей лазерной спектроскопии высокого разрешения, обеспечивающих разрешение спектральных структур, на порядок более узких, чем естественная ширина используемых спектральных линий.

Целый ряд приоритетных результатов был получен в группе, возглавляемой профессором Короленко П.В. В ходе выполненных в этой группе исследований был впервые теоретически установлен и экспериментально исследован волноводный режим генерации газовых лазеров, когда роль волновода играет активная среда с деформированным под действием светового поля профилем

усиления. Существенный вклад в теорию и практику использования оптических резонаторов внесли работы группы, посвященные механизму формирования и взаимодействия в резонаторах лазеров многоходовых мод. Предложенные схемы резонаторов с пространственно-неоднородным выводом энергии многоходовых мод позволили формировать на выходе мощных широкоапертурных лазеров узконаправленные пучки с малой угловой расходимостью.

П.В.Короленко выступил инициатором проведения работ в области сингулярной и фрактальной оптики. Под его руководством был осуществлен анализ статистических характеристик лазерных пучков с фазовыми сингулярностями в форме дислокаций волнового фронта, возникающими либо в лазерных резонаторах, либо в зоне распространения лазерных пучков. Было установлено, что появление дислокаций, как правило, сопряжено с образованием каустик. Одновременно было показано, что при распространении лазерных пучков с фрактальной структурой дифракционное перераспределение амплитуд и фаз световых колебаний не приводит к заметным изменениям фрактальной размерности распределения интенсивности.

Группой П.В.Короленко выполнен также цикл экспериментальных исследований по распространению лазерного излучения в случайно-неоднородных передающих средах. Совместно с кафедрой радиофизики были проведены измерения флуктуаций лазерных пучков на приземных атмосферных трассах, работающих в условиях большого города. В ходе экспериментов подробно рассмотрены статистические характеристики лазерных пучков в режимах слабой, сильной и перемежающейся турбулентности атмосферы. Измерения, выполненные на трассах и на лабораторной модели турбулентной среды, дали возможность установить связь между плотностью дислокаций волнового фронта излучения и интенсивностью турбулентности. Эта связь легла в основу предложенного метода определения структурной характеристики флуктуаций показателя преломления по количеству наблюдаемых дислокаций. К приоритетным результатам, полученным в данном направлении исследований, следует отнести обнаружение фрактальной структуры в случайных смещениях лазерных пучков. Это явление открывает новые возможности в диагностике турбулентной атмосферы.

### **7.3. Твердотельные лазеры и волоконная оптика (история создания и направления исследований)**

Формирование научного направления. Научные интересы группы “Твердотельные лазеры и волоконная оптика” связаны с исследованиями динамики излучения многомодовых твердотельных и полупроводниковых лазеров и с изучением распространения и взаимодействия оптических сигналов в волоконных световодах.

Исследования, а также подготовка студентов и аспирантов в этой области на кафедре оптики и спектроскопии были инициированы в 1980 году академиком А.М.Прохоровым и профессором Л.С.Корниенко. По их инициативе под руководством доцента Исаева С.К. был создан лазерный спецпрактикум и началось чтение ряда новых спецкурсов (“Физика лазеров” и “Волоконная оптика”). Научная работа проводилась в сотрудничестве с Отделом физических проблем квантовой электроники НИИЯФ и на его экспериментальной базе.

До 1993 года исследования в области нелинейных свойств волоконных световодов и волоконных лазеров проводились под руководством доцента С.К. Исаева, а

исследования в области динамики излучения твердотельных лазеров – под руководством ассистента О.Е. Нания совместно с группой Н.В.Кравцова (НИИЯФ МГУ). После ухода с кафедры доцента С.К.Исаева оба направления исследований были объединены под руководством О.Е.Нания.

С 1999 года исследования в области волоконной оптики были существенно расширены в связи с включением в план научной работы задач, связанных с повышением качества и скорости работы волоконно-оптических систем передачи информации.

Экспериментальные исследования. Фундамент для самостоятельных экспериментальных исследований в области динамики твердотельных лазеров на кафедре оптики и спектроскопии был создан с приходом опытных талантливых экспериментаторов: научного сотрудника к.т.н. В.Г.Воронина и физика В.И.Хлыстова. Их усилиями в 1994 году была запущена установка для исследования характеристик твердотельных лазеров с монохроматической накачкой. В течение 5 лет на ней проводились исследования источников шумов в твердотельных кольцевых лазерах, акустооптических методов управления режимами генерации твердотельных лазеров и методов стабилизации многоцветных лазеров.

К основным экспериментальным результатам этого периода (1994-1999 гг.) следует отнести следующие. Проведены экспериментальные исследования генерационных характеристик серии редкоземельных гранатов. Изучены и реализованы различные схемы перестройки частоты генерации лазеров на их основе, измерены области перестройки.

Впервые измерен спектр излучения и ширина области перестройки длины волны генерации лазера на  $GdVO_4:Nd$ . Измерен спектр шумов однонаправленного кольцевого чип-лазера, изучено влияние магнитного поля на спектр шумов и определена природа резонансов в спектре низкочастотных шумов. Изучены характеристики кольцевых лазеров с акустооптическим невзаимным элементом и “самовозвращением” дифрагированных лучей. Впервые создан монолитный кольцевой чип-лазер с акустооптическим невзаимным элементом.

Впервые реализован высокостабильный двухцветный твердотельный лазер с дисперсионным резонатором. В 1999 г. экспериментальная база для научных исследований была существенно модернизирована в связи с расширением исследований в области волоконно-оптической связи. В научную группу вошел молодой, энергичный научный сотрудник (в настоящее время ассистент) А.Н. Туркин. В сотрудничестве с Научным Центром волоконной оптики им. А.М.Прохорова Института общей физики Российской Академии наук, при поддержке компании “Оптиктелеком” за очень короткий срок была создана уникальная экспериментальная установка для исследования генерационных характеристик волоконного иттербиевого лазера и волоконных конверторов на вынужденном комбинационном рассеянии. На этой установке были обнаружены новые явления – самопроизвольное переключение поляризации излучения волоконного лазера и автосвищивание частоты излучения лазера.

В 2003 г. начаты экспериментальные исследования характера распространения оптических импульсов в волоконно-оптических линиях связи. Впервые экспериментально исследовано совместное влияние поляризационной модовой и

хроматической дисперсии, а также поляризационно-зависимых потерь на характеристики оптических сигналов в линиях связи. В течение 2003-2004 года проводились полевые измерения сезонных колебаний величины хроматической и поляризационной модовой дисперсии на действующей волоконно-оптической линии связи Москва – Владивосток. Проведенные исследования позволили создать модель сезонных изменений хроматической дисперсии, необходимую для разработки программного обеспечения, управляющего компенсаторами дисперсии.

Теоретические исследования. Теоретические исследования по тематике группы “Лазеры и волоконная оптика” начались на кафедре оптики и спектроскопии в 1980 г. и были связаны с изучением динамики излучения твердотельных лазеров.

Основы теории динамики твердотельных кольцевых лазеров (ТКЛ) были заложены в работах Е.Г.Ларионцева с сотрудниками (НИИЯФ) и Я.И.Ханина с сотрудниками (г. Нижний Новгород), в которых была установлена природа автомодуляционных колебаний в ТКЛ I и II рода. В исследованиях, проведенных на кафедре в 1980-1999 гг. (О.Е.Наний, А.В. Селунский, М.Р.Палеев), теория автомодуляционных колебаний была развита на случай произвольных поляризаций встречных волн и на случай работы кольцевого лазера в режиме вынужденной синхронизации мод. Предложен новый подход к описанию автомодуляционного режима генерации в ТКЛ с неплоским резонатором на основе так называемого метода обобщенных мод кольцевого резонатора. Этот метод в дальнейшем успешно применен для описания многомодовых режимов генерации ТКЛ.

Наряду с продолжением теоретического изучения кольцевых лазеров в 1990 г. были начаты работа по исследованию сложных динамических режимов многомодовых лазеров с внутрирезонаторной генерацией второй гармоники (ВРГВГ) (М.Р.Палеев, О.Е.Наний). Интересным результатом явилось обнаружение стабильных четырехчастотных режимов генерации в ТКЛ с ВРГВГ. Один из интереснейших результатов – обнаружение в численном эксперименте принципиально нового типа динамики лазеров – многозначной динамики.

Исследование невязимных эффектов различной природы – еще одно теоретическое направление, развиваемое в группе. Сотрудниками группы обнаружен новый нелинейный невязимный эффект в ТКЛ с внешней подсветкой активного элемента. Существенный вклад внесен в изучение акустооптических невязимных эффектов. Впервые изучено влияние возвращения дифрагированного излучения на модулятор и продемонстрирована возможность увеличения амплитудной и фазовой невязимности более чем на порядок. Создана теория невязимных эффектов при анизотропной дифракции и при дифракции на поверхностных акустических волнах.

## **8. Практикумы**

После кончины Ф.А. Королева в 1979 г. обязанности заведующего кафедрой исполнял профессор Леонид Сергеевич Корниенко, который с начала 1980 г. стал заместителем заведующего кафедрой академика Александра Михайловича Прохорова. Благодаря усилиям Л.С.Корниенко работа кафедры оптики и спектроскопии была существенно перестроена, она стала работать по новому учебному плану. К чтению лекций и постановке задач в практикумах были привлечены научные сотрудники отдела ФПКЭ НИИЯФ. В качестве научной базы стали гораздо шире использоваться ИОФАН, ФИАН и другие академические

институты. Началось чтение лекций по компьютерным методам, а на машинной базе НИИЯФ был создан соответствующий практикум.

### 8.1. История создания оптического практикума

Физический практикум в Московском университете был организован в 1904 г. профессором А.П.Соколовым (1854-1928). Он написал первое в России учебное пособие по лабораторным занятиям “Физический практикум” (“Руководство к упражнениям для начинающих в физической лаборатории, состоящей при Физическом Институте Московского Университета”), напечатанное в типографии Императорского Московского Университета в 1909 г. В предисловии к “Физическому практикуму” А.П.Соколов подробно излагал правила работы студентов в лаборатории. Он считал, что для успешного проведения физических измерений каждый практикант должен усвоить известные приемы и навыки, выработанные многолетним опытом творцов науки: правила обращения с приборами, правила производства измерений и обработки результатов измерений, правила вычисления искомой величины и нахождения погрешности измерений на основе теории вероятностей, должен знать правила приближенных вычислений и уметь графически изображать результаты измерений.

Курс практических занятий состоял из двух разделов – общего и специального. Общий практикум был рассчитан на студентов 1-го курса. В разделе “Оптика” общего практикума было 17 задач, посвященных следующим темам:

1. Сравнение силы двух источников света фотометром Луммера-Бродхуна, контрастным фотометром.
2. Определение радиуса кривизны линзы сферометром или через отражение.
3. Определение фокусного расстояния выпуклой и вогнутой линз.
4. Определение увеличения микроскопа, увеличения и поля зрения трубы.
5. Изучение спектров раскаленных паров металлов, спектров газов в гейслеровских трубках, спектров поглощения с помощью спектроскопа.
6. Определение показателя преломления стеклянной призмы спектрометром, твердых тел – тотальрефлектометром Кольрауша.
7. Измерение длины световой волны D-линии натрия, красной линии лития на спектрометре с помощью дифракционной решетки (сетки).
8. Изучение явления поляризации света на простом приборе Норренберга, явлений вращательной поляризации на сахариметре Солейля, определение содержания сахара в растворе сахариметром Лорана.

Студенты 1-го курса должны были выполнить не менее 20-ти задач общего практикума, из них 3-5 обязательных задач по оптике, темы которых определялись выбранной студентами специальностью. Студенты-физики выполняли задачи по фотометрии, по изучению спектров с помощью спектроскопа, по измерению длины световой волны или определению показателя преломления призмы с помощью спектрометра, по поляризации света.

Студентам-метеорологам нужны были задачи по изучению зрительной трубы, по изучению спектров с помощью спектроскопа, по изучению явлений поляризации света. Студенты, специализирующиеся по физической химии и биологии, знакомились с микроскопом, спектроскопом и спектрометром, изучали явления поляризации света и сахариметр. Студентам, специализирующимся по математике, механике и астрономии, требовались задачи по фотометрии, по использованию зрительной трубы, по определению фокусного расстояния линзы.



Специальный практикум содержал более сложные задачи. К нему допускались студенты 2-го курса, обнаружившие свои способности и прилежание. Специальный практикум не носил определенного характера, задачи в нем изменялись в зависимости от наличия приборов или от специальности практикантов. К оптическому разделу относились задачи, посвященные следующим темам:

1. Изучение искровых спектров металлов.
2. Изучение хроматической поляризации света в параллельных лучах и в сходящихся лучах с помощью поляризационного аппарата Норренберга.
3. Измерение длины световой волны бипризмой Френеля-Винкельмана.
4. Изучение явлений отражения и преломления света и эллиптической поляризации на приборе Жамена.

По каждой задаче был приведен подробный порядок работы. В правилах прохождения практикума подчеркивалось, что студент должен выполнять задачу самостоятельно, лишь в крайних случаях обращаясь с вопросами к лаборанту. В книге А.А.Соколова имеется также план 3-го этажа Физического института с указанием номеров комнат практикума и размещения в этих комнатах задач и вспомогательных приборов.

Во втором издании практикума (1926) раздел “Оптика” был несколько изменен и дополнен. Задачи специального практикума отчасти были исключены, отчасти перенесены в общий практикум. Новыми задачами были: «Определение показателя преломления жидкостей рефрактометром Аббе», «Определение коэффициентов поглощения растворов в видимой части спектрофотометром Кёнига-Мартенса», «Определение коэффициентов поглощения жидкостей в инфракрасной части спектра (спектрометр с термоэлементом)». В подготовке второго издания «Физического практикума» принимали участие С.И.Вавилов, А.С. Предводителей, С.Н.Ржевкин и другие сотрудники факультета.

В 1930 г. на факультете была образована кафедра общей физики, которую возглавил С.И.Вавилов. Он придавал большое значение практическому обучению студентов и привлек для работы по подготовке третьего издания «Физического практикума» многих сотрудников практикума. Однако в 1932 г. Вавилов был избран действительным членом Академии наук, переехал в Ленинград и не смог продолжить работу по переизданию практикума. Эта работа была возобновлена без его участия после 1935 г.

Третье издание “Физического практикума” А.П.Соколова, дополненное и переработанное преподавателями физического факультета В.Г.Корицким, Е.С.Четвериковой и Е.С.Щепотьевой, вышло в свет в 1937 г. В разделе “Оптика” этого издания содержалось 20 задач. В основном повторялись задачи, приведенные в 1-м и 2-м изданиях. Среди добавленных задач были: “Проверка закона обратных квадратов с помощью фотоэлемента и определение чувствительности фотоэлемента”, “Определение радиуса кривизны линзы и длины световой волны с помощью колец Ньютона”, “Определение длины световой волны по величине зон Френеля”. Четвертое издание “Физического практикума” А.П.Соколова было выпущено в 1938 г. практически без изменений.

В бытность С.И.Вавилова на физическом факультете Московского университета по его инициативе было образовано несколько специальных практикумов (спецпрактикумов), в которых проходили подготовку студенты старших курсов

В послевоенные годы физический практикум занимал весь 3-й этаж здания физфака МГУ на Моховой, а оптический спецпрактикум размещался на этом же этаже в боковой комнатке. Занятия в оптическом спецпрактикуме проводили профессор П.А.Бажулин, который был заведующим этим спецпрактикумом, ассистенты кафедры оптики Е.М. Акимов и В.В.Лебедева (с 1953 г.), а также аспиранты кафедры оптики. Практикум был обязательным для студентов 3 и 4 курсов (6 и 7 семестров) кафедры оптики. Задачи в нем выполняли студенты и некоторых других кафедр, а также студенты-геологи и студенты-биологи. Некоторые задачи оптического спецпрактикума размещались в комнате №31 кафедры на 1-м этаже, где занятия проводили Е.В.Загорянская и Н.Г.Иванова.

Описания задач были опубликованы в 1945 г. в 1-м томе сборника “Специальный физический практикум”, под редакцией Г.В.Спивака. В составлении описаний задач оптического раздела участвовали П.А.Бажулин, В.И.Мальшев, С.Л.Мандельштам, С.М.Райский, И.Л. Фабелинский, в подготовке описаний к печати активное участие принимал Ф.А.Королев.

К оптическому спецпрактикуму относились следующие задачи:

1. Эффект Зеемана, определение удельного заряда электрона. Задача выполнялась с ртутной лампой, в качестве диспергирующего элемента использовалась пластинка Люммера-Герке.
2. Проверка формулы молекулярной рефракции Лорентц-Лоренца для смесей двух компонент – бензола и ацетона (рефрактометр Пульфриха).
3. Изучение показателя преломления в зависимости от давления (интерферометр Жамена).
4. Определение оптическим методом скорости ультразвуковых волн в жидкостях. В задаче наблюдались: а) дифракция света на ультразвуковой волне, б) стоячие ультразвуковые волны методом темного поля.
5. Изучение коэффициента отражения и поляризации света в зависимости от угла падения света (формулы Френеля).
6. Изучение явления комбинационного рассеяния света в СС1 и циклогексане и в их смеси.
7. Измерение степени деполяризации рассеянного света в жидкостях.
8. Призмный спектрограф (установка и проверка спектрографа, съемка и расшифровка спектрограмм). Использовался спектрограф производства мастерских физического факультета (с призмой Резерфорда).
9. Качественный спектральный анализ фотографическим методом. Задача выполнялась на призмном спектрографе предыдущей задачи.
10. Количественный спектральный анализ визуальным методом с помощью стилометра. Использовался трехпризмный стилометр производства мастерских физического факультета (с призмой Аббе между двумя 60-градусными призмами).
11. Спектральный анализ фотографическим методом по способу “трех эталонов”. Задача выполнялась на стилометре в его фотографическом варианте.

15 марта 1948 г. Совет Министров СССР принял постановление о строительстве новых зданий Московского университета на Ленинских горах. В этом постановлении было предусмотрено оснащение лабораторий и кафедр МГУ новейшим оборудованием. Примерно с 1949 г. новая спектральная аппаратура стала поступать и на кафедру оптики. В числе первых поступлений были три кварцевые спектрографа ИСП-22. Спектрограф ИСП-22 был разработан в

последний год Великой Отечественной войны (в 1944-1945 гг.) в Государственном оптическом институте и выпускался Ленинградским оптико-механическим заводом. Один из полученных спектрографов был использован в оптическом спецпрактикуме для задачи «Качественный спектральный анализ». На базе двух других спектрографов ИСП-22 и другой новой аппаратуры доцент кафедры Елизавета Васильевна Загорянская организовала учебную лабораторию по специализации. Лаборантом в этой лаборатории была Надежда Афанасьевна Кондионова (Соколова).

## **8.2. Учебная лаборатория по специализации**

Лаборатория по специализации занимала комнату №31 на 1-м этаже здания физического факультета на Моховой и предназначалась для занятий студентов кафедры оптики на 4 и 5 курсах (в 8 и 9 семестрах), т.е. практически одновременно с началом их работы в научных лабораториях над темами дипломных работ. В этой лаборатории студенты приобретали навыки самостоятельной практической работы и углубляли теоретические знания по соответствующим разделам оптики. Работа в учебной лаборатории отличалась от выполнения задач спецпрактикума, она требовала от студентов большой самостоятельности и инициативы.

Студенты выполняли задачи по эмиссионному качественному и количественному спектральному анализу на спектрографах ИСП-22 и на полученном несколько позже спектрографе КС-55 со сменной кварцевой и стеклянной оптикой. Для обработки спектрограмм использовались микрофотометр МФ-2, спектропроектор ПС-18 и столик для рассматривания спектрограмм МИР-1.

В здании физического факультета на Ленинских горах лаборатория по специализации была размещена в двух комнатах на первом этаже. Количество задач было увеличено. Поступление на кафедру нового спектрального оборудования позволяло ставить в лаборатории по специализации новые задачи. Например, студенты выполняли задачи на спектрографе ИСП-66, фотографируя спектры ртути, дистиллированной воды, гипса, квасцов, а также на спектрографе ИСП-72. В лаборатории некоторое время использовались интерферометр Майкельсона-Тваймана, оптическая скамья ОС-2. Позже студенты фотографировали ртутный спектр в области 180-250 нм на вакуумном спектрографе СП-33, для фотографирования молекулярных спектров циана использовалась автоколлимационная камера УФ-85 с фокусным расстоянием 1300 мм в сочетании с дифракционной решеткой.

На выполнение экспериментальной части каждой лабораторной работы отводилось в среднем три шестичасовых занятия. Перед очередной работой студенты проходили собеседование с преподавателем по теоретическому материалу и по устройству экспериментальной установки, на которой предстояло работать. За два семестра в лаборатории необходимо было выполнить шесть учебных заданий. Такая углубленная экспериментальная подготовка позволяла студентам приобрести опыт самостоятельной исследовательской работы, который они использовали в дальнейшем при выполнении дипломной работы.

Занятия в лаборатории проводили заведующий кафедрой Ф.А. Королев, Е.В. Загорянская, Н.Г. Гусева, А.А. Бабушкин, А.Р. Стриганов. Позже, с 1958 г., в лаборатории по специализации преподавали также В.В. Лебедева, А.И. Одинцов, Б.Д. Рыжиков. Лаборантами в разное время были Зоя Попова, Инна Александровна

Рамазина, Анастасия Федотовна Маликова, Надя Гринева, которая одновременно училась на факультете журналистики и стала потом журналистом.

В 1966 г., когда В.В.Лебедевой, А.И.Одинцовым и Б.Д.Рыжиковым был опубликован «Лабораторный практикум», в лаборатории по специализации были представлены 15 задач, охватывающих два наиболее важных раздела спектроскопии – атомную спектроскопию и молекулярную спектроскопию.

В первом разделе имелись задачи по различным методам исследования плазмы (измерение температуры плазмы по атомным линиям и молекулярным спектрам, измерение концентрации электронов в плазме по ширине спектральной линии водорода, определение вероятностей переходов спектральных линий). Были работы по исследованию структуры линий ртути 546,1 нм и лития 670,7 нм методами спектроскопии высокого разрешения с эталоном Фабри-Перо, простым и сложным (мультиплексом) с толщинами 3 мм и 15 мм. При исследовании линии лития в качестве источника света с тонкими спектральными линиями использовался разряд в полой катод. Студенты изучали серийную структуру атомных спектров ряда элементов. Они знакомились также с лазером на смеси гелия и неона с длиной волны 632,8 нм, с помощью интерферометра толщиной 150 мм исследовали спектральный состав его генерации, измеряли угловую расходимость мод, величину усиления в активной среде лазера. В практикуме имелись и аналитические задачи, в которых студенты проводили качественный и количественный анализ различных сплавов (бронз, сталей или алюминиевых сплавов).

В разделе молекулярной спектроскопии имелись задачи по электронным и колебательным спектрам поглощения, а также по спектрам комбинационного рассеяния. Студенты знакомились с методами исследования спектров поглощения и качественного и количественного анализа в ультрафиолетовой, видимой и инфракрасной областях спектра, а также с методом исследования спектров люминесценции. Эмиссионные молекулярные спектры использовались при измерении температуры плазмы по спектру циана.

В задачах использовались кварцевый спектрограф ИСП-22, спектрограф КС-55 со сменной кварцевой и стеклянной оптикой, трехпризменный спектрограф ИСП-51, спектрофотометр СФ-4, интерферометры Фабри-Перо с различными толщинами, инфракрасный спектрометр ИКС-11.

В 1974 году учебная лаборатория по специализации была ликвидирована, ее две комнаты отошли научным лабораториям кафедры. Часть задач лаборатории в упрощенных вариантах, рассчитанных на выполнение за одно учебное занятие, была передана в оптический спецпрактикум, а более углубленная подготовка студентов была перенесена в научные лаборатории.

### **8.3. Спецпрактикум кафедры**

В книге «Практикум по спектроскопии», вышедшей в свет в 1976 г. под редакцией проф. Л.В.Лёвшина, подведены итоги развития кафедрального специального оптического практикума и учебной лаборатории по специализации. В книге имеется 6 глав, в которых представлены описания 19 задач: по эмиссионному спектральному анализу (3 задачи), по структуре атомных спектров (2 задачи), по колебательным спектрам (4 задачи), по люминесценции и электронным спектрам

поглощения (4 задачи), по спектроскопическим методам диагностики плазмы (4 задачи), по лазерам (2 задачи). Каждая из глав содержит краткий обзор основных понятий и теоретических сведений по соответствующему разделу спектроскопии, необходимых студенту для выполнения задач этого раздела практикума. Текст каждой из 19 задач состоит из теоретической части и описания нескольких упражнений, на выполнение которых требуется от 9 до 36 учебных часов. Конкретная программа работы студента определялась преподавателем практикума. В приложении приведены основные табличные данные, необходимые при обработке полученных экспериментальных результатов.

В учебных установках были использованы: разборный спектрограф с призмой Резерфорда производства мастерских физического факультета, очень удобный для учебных целей и описанный еще в книге “Специальный физический практикум” (1945), кварцевый спектрограф ИСП-22, трехпризменный спектрограф ИСП-51, интерферометр Фабри-Перо ИТ-51, инфракрасный спектрометр ИКС-21, спектрофотометр СФ-4, монохроматор УМ-2, спектрограф КСА-1 (КС-55), спектрограф СТЭ-1.

В написании текста книги “Практикум по спектроскопии” участвовали преподаватели и сотрудники кафедры оптики и спектроскопии А.И.Акимов, В.В.Лебедева, Л.В.Лёвшин, В.В.Михайлин, А.И.Одинцов, В.И.Одинцов, Н.И.Резаев, Б.Д.Рыжиков. При создании книги учитывался опыт преподавателей практикума, работавших в нем в предшествующие годы и создававших описания соответствующих задач.

В здании физического факультета на Ленинских горах оптический спецпрактикум с самого начала (с 1953 г.) располагался в трех комнатах на 2 этаже факультета. В 1977 г. он был несколько сокращен и перемещен в 2 комнаты – одна в цокольном этаже (Ц-70), вторая на 2-м этаже (2-55). С приходом на кафедру в качестве и.о. заведующего кафедрой проф. Л.С. Корниенко в 1979 г. оптический спецпрактикум был снова перемещен, на этот раз на 5-й этаж Южного крыла факультета, где ему была предоставлена комната 5-03а (площадью в полтора стандарта), в которой практикум находится и сейчас. Лаборантом в практикуме около сорока лет (1954-1993) была Лидия Ивановна Миронова, окончившая в 1953 г. двухгодичный техникум при физическом факультете МГУ. С 1983 г. по настоящее время в практикуме работает Марина Владимировна Рдультовская (по мужу Ннуга Монго), а в последние годы – Елена Васильевна Фурсова и Людмила Евгеньевна Гринь.

С приходом на кафедру Л.С. Корниенко и переводом кафедры на Отделение ядерной физики спецпрактикум кафедры претерпел значительные изменения. С одной стороны – при перемещении практикума в 5-03а существенно сократилось количество задач по спектроскопии. С другой стороны – при участии сотрудников отдела физических проблем квантовой электроники (ОФПКЭ) НИИЯФ, которым также руководил Л.С. Корниенко, были введены в действие новые и модернизированы имевшиеся лабораторные работы по лазерной физике. В работе «Гелий-неоновый лазер» регистрация спектра излучения стала осуществляться радиочастотными методами – эту модернизацию провел с.н.с. ОФПКЭ (впоследствии доцент кафедры) С.К.Исаев. Он же поставил новую задачу «Спектральные характеристики вынужденного излучения», в которой на примере двух лазерных систем изучались изменения спектральных свойств излучения при его усилении в веществе, являющемся узкополосным резонансным усилителем, и

структура спектра, обусловленная оптическим резонатором. Сотрудник ОФПКЭ В.В.Радченко поставил новую задачу «Генерационные характеристики активного стекловолокна». В ней экспериментально исследовались энергетические и временные характеристики излучения многоволоконного безрезонаторного лазера.

Кроме этого в программу экспериментального обучения студентов кафедры оптики были включены две лабораторные работы по лазерной физике и нелинейной оптике, уже функционировавшие тогда в специальном практикуме Отделения ядерной физики.

В одной из этих работ – «Динамика генерации твердотельного лазера» – студенты экспериментально изучали основные режимы генерации твердотельного лазера: свободную генерацию, режим модуляции добротности и режим синхронизации мод. В другой – «Нелинейные оптические эффекты» – на примере генерации второй гармоники излучения неодимового лазера студенты знакомились с основными представлениями о нелинейных оптических эффектах.

Поскольку в комнате 5-03а, где был сосредоточен спектроскопический раздел практикума, было уже довольно тесно, новые учебные установки, на которых ставились лабораторные работы по лазерной физике, были расположены в комнатах ОФПКЭ 2-01 и 2-02 в корпусе нелинейной оптики. В 1985 г. туда же были перемещены и ранее поставленные задачи «Гелий-неоновый лазер» и «Динамика генерации твердотельного лазера». В дальнейшем там были поставлены задачи также по волоконной оптике (О.Е.Наний, В.Г.Воронин). Для расширения спецпрактикума кафедры активно использовались возможности и других отделов НИИЯФ. На базе лаборатории специального практикума НИИЯФ, где уже функционировала лабораторная работа «Нелинейные оптические эффекты», в 1989 году В.И. Одинцовым и О.М.Вохник была поставлена новая задача по нелинейной оптике «Обращение волнового фронта оптического излучения». В помещении 1-54 19-го корпуса в 1991 году А.И.Одинцовым и О.М.Вохник была поставлена лабораторная работа по изучению инфракрасных спектров поглощения, выполнявшаяся на спектрофотометре «Spectrum 75 IR», принадлежавшем лаборатории ядерных реакций НИИЯФ.

Развивался и модернизировался и практикум по спектроскопии в комнате 5-03а, где студенты 3-го курса (6-й семестр), только пришедшие на кафедру, знакомятся с экспериментальными методами в оптике. В 1985 года доцентом кафедры А.И.Федосеевым была поставлена новая лабораторная работа «Спектральные характеристики диэлектрических зеркал и интерференционных светофильтров», использующая спектральный вычислительный комплекс КСВУ.

После возвращения на кафедру группы проф. В.В.Михайлина в 1994 г. был создан теоретический практикум по спектроскопии твердого тела, практикум лаборатории синхротронного излучения и практикум на синхротроне С-60 лаборатории электронов высоких энергий ФИАН.

Начиная с 1999 г. под руководством проф. П.В.Короленко силами сотрудников и аспирантов группы (Зотов А.М., Макаров В.Г., Полоско А.Т., Таначев И.А.) создан теоретический практикум по оптике (компьютерная оптика), насчитывающий более 10 упражнений. При выполнении заданий практикума студенты закрепляют лекционный материал, приобретают навыки моделирования процессов преобразования структуры лазерных пучков, овладевают приемами обработки

Более подробно ознакомиться с задачами специального практикума кафедры оптики и спектроскопии можно в [соответствующем разделе](#).

#### 8.4. Литература по практикуму

1. Соколов А.П. Физический практикум. Руководство к практическим работам по физике. Гос. изд-во, М.-Л. изд.1-е, 1909 г., 293 с.; изд.2-е, 1926 г. 375 с.; изд.3-е, 1937 г., 463 с.; изд.4-е, 1938 г., 463 с.
2. Специальный физический практикум. Под ред. Г.В.Спивака. Т.1. ОГИЗ, Гостехиздат, М.-Л., 1945, 280 с.
3. Лебедева В.В., Одинцов А.И., Рыжиков Б.Д. Лабораторный практикум по специальности “Оптика и спектроскопия”. МГУ, физический факультет, Москва, 1966, 44 с.
4. Практикум по спектроскопии. Под ред. проф. Л.В.Лёвшина. Изд-во Моск. ун-та. Москва. 1976, 320 с.
5. Аннотации лабораторных работ специального практикума. В сб. “Кафедра оптики и спектроскопии. Учебная программа и научная тематика”. Сост. сборника Вохник О.М.; Моск. гос. ун-т, физический факультет. Москва, 2000, с. 68-83, 2003, с. 68-83.