

Л. В. Ильичев, А. М. Шалагин

КАФЕДРА КВАНТОВОЙ ОПТИКИ

Заведующий кафедрой: чл.-корр. РАН, д-р физ.-мат. наук, проф. А. М. Шалагин

Направление подготовки: 510412 – Физика оптических явлений

Базовый институт: Институт автоматки и электрометрии СО РАН

Сервер кафедры: <http://www/phys.nsu.ru/k11/>

Кадровый состав

Ильичев Леонид Вениаминович, зам. зав. кафедрой, д-р физ.-мат. наук, проф.

Чаповский Павел Львович, д-р физ.-мат. наук, проф.

Чаплик Александр Владимирович, д-р физ.-мат. наук, проф.

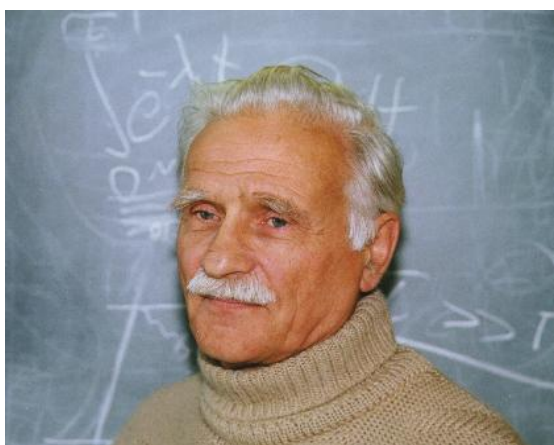
Тайченачев Алексей Владимирович, д-р физ.-мат. наук, доц.

Николаев Геннадий Николаевич, канд. физ.-мат. наук, доц.

Сорокин Владимир Алексеевич, канд. физ.-мат. наук, ассист.

Краткая характеристика кафедры, ее история и сегодняшний день

Кафедра получила свое нынешнее название в 1977 г. До этого с 1965 г. на факультете существовала специальность «Квантовая радиофизика» при кафедре физики полупроводников. В 1969 г. специальность выделилась в отдельную кафедру. В 1998 г. на базе кафедры был создан учебно-научный центр «Квантовая оптика». С момента создания и до 2002 г. кафедрой руково-



дил чл.-корр. РАН С. Г. Раутиан (на снимке). Сам он является учеником выдающегося отечественного физика-оптика Г. С. Ландсберга и возглавляет вместе с нынешним руководителем кафедры, чл.-корр. РАН А. М. Шалагиным

известную научную школу в области нелинейной лазерной спектроскопии. Среди первых преподавателей кафедры были С. К. Савиных, К. К. Свиташов, Г. И. Сурдутович и Е. С. Филатова. В период с 1972 по 1977 г. заведующего кафедрой С. Г. Раутиана замещал д-р физ.-мат. наук В. Н. Карнюшин.

Кафедру окончили более 400 чел. Из них 100 чел. стали кандидатами, а 20 чел. – докторами наук. Бывшие студенты кафедры работают ныне во многих лабораториях России, Европы и США, где ведутся разнообразные исследования с применением оптических методов. Это не только физика, но и биофизика. Выпускники кафедры уже включились в исследования самого, пожалуй, многообещающего направления современной физики – создания квантовых информационных технологий. Столь большая востребованность выпускников кафедры свидетельствует о высокой оценке качества подготовленных специалистов. Это качество есть результат тщательно продуманной, отработанной годами и постоянно совершенствуемой системы спецкурсов. Содержания преподаваемых дисциплин согласованы друг с другом и с направлениями исследований лабораторий базового для кафедры Института автоматки и электрометрии СО РАН и ряда других НИИ (Института физики полупроводников СО РАН, Института лазерной физики СО РАН, Института химической кинетики и горения СО РАН, Конструкторско-технологического института научного приборостроения), где студенты проходят научную практику. Тематика этих исследований, в свою очередь, отражает многие новейшие мировые тенденции в оптических и спектроскопических исследованиях. Последнее обстоятельство играет главную роль, определяющую качество подготовки специалистов.

Специализация

Учебная программа включает в себя следующие курсы лекций.

«Оптические измерения» сопряжены с началом практики, когда студент начинает свою практику в одной из лабораторий. На этом этапе происходит его адаптация в научном коллективе, возможна смена места практики в соответствии со склонностями и уже обозначившимся сознательным интересом, позволяющим студенту выбрать то или иное направление исследований для предстоящей подготовки дипломной работы. При этом студент приобретает навыки работы с оптическими приборами и устройствами, сведения о которых получает на лекциях. Он должен получить знания о физике основных нелазерных источников света, приемниках излучения, об основах геометрической теории оптических изображений, о спектральных приборах с призмами и дифракционными решетками, об интерференционных методах оптических исследований.

«Физика лазеров» дает студентам знания об основных принципах – о вынужденном излучении, усилении и поглощении света, об обратной связи в лазерах, об условии получения генерации. Излагается история создания лазеров. Сообщаются параметры современных лазеров. Даются основы физики взаимодействия излучения с газом, физики гауссовых пучков, волноводов и резонаторов. При этом студент уже частично знаком с методами расчета резонаторов по курсу «Оптических измерений». Рассматриваются практически все существующие типы лазеров: гелий-неоновый лазер, газовые лазеры на атомных переходах с прямым электронным возбуждением, ионные лазеры, непрерывные лазеры на переходах атомов металлов, молекулярные лазеры, газодинамические и химические лазеры, импульсные лазеры на переходах атомов и молекул, лазеры на растворах органических красителей, твердотельные лазеры, полупроводниковые лазеры.

«Физическая оптика» является естественным «оптическим» дополнением и продолжением того образования, которое студент получил в общих университетских курсах по электродинамике и физике сплошных сред. После вводной части (уравнения Максвелла, материальные уравнения, феноменология диссипации энергии, общие представления о нелинейных явлениях) излагаются физика плоских волн в однородной изотропной среде, отражение и преломление волн на плоской границе, распространение волн в неоднородных средах. Изуча-

ется дифракция. Значительное внимание уделено понятиям и явлениям кристаллооптики и молекулярного рассеяния света. Излагаются основы теории уширения спектральных линий, введены соответствующие модели, рассмотрены фазовая и частотная модуляция, коллапс спектральных структур. Чтение лекций сопровождается семинарами, чрезвычайно способствующими активному усвоению материала.

«Спектроскопия» обстоятельно излагает систематику спектров многоэлектронных атомов, периодической системы элементов, теории сверхтонкой структуры спектральных линий, интенсивности спектральных линий и правил отбора для дипольного излучения. Рассмотрены эффекты внешнего поля (эффект Штарка и эффект Зеемана). Даны общие свойства и систематика спектров двухатомных молекул. Рассмотрены электронные состояния двухатомных молекул, типы связи по Гунду, колебания и вращение двухатомных молекул, колебания многоатомных молекул, возмущения в колебательных спектрах многоатомных молекул и вращение многоатомных молекул.



«Нелинейная спектроскопия» читается по традиции одним из главных представителей научной школы по нелинейной лазерной спек-

троскопии газовых сред – проф. А. М. Шалагиным. На снимке он вместе с зам. зав. кафедрой Л. В. Ильичевым возле дома Эренфестов в голландском Лейдене. К этой школе принадлежат и некоторые другие сотрудники кафедры.

Студенты овладевают одной из базовых моделей квантовой оптики – двухуровневой квантовой системой, взаимодействующей с монохроматическим излучением. Используются аппарат амплитуд вероятностей и его обобщение – аппарат матрицы плотности. Излагается чрезвычайно важный метод спектроскопии пробного поля. Рассмотрены нелинейная спектроскопия в условиях большого доплеровского уширения и спектры спонтанного испускания.

«Кинетические проблемы в нелинейной спектроскопии» продолжают предыдущий спецкурс. Здесь рассматриваются эффекты межчастичных столкновений в облучаемых газовых средах. При этом используются знания, полученные студентами при прохождении курса «Физической оптики». Рассмотрено силовое действие излучения на частицы газа. Изучаются интерференция атомных состояний и элементы поляризационной нелинейной спектроскопии. Излагается физика светоиндуцированных газокинетических явлений. Это целый класс эффектов, родственных так называемому светоиндуцированному дрейфу (СИД), открытому в 1979 г. сотрудниками и выпускниками кафедры. В их основе лежит своеобразное несилевое воздействие лазерного излучения на смесь газов, приводящее к их относительному движению. Эффект СИД при подходящих условиях проявляется необычайно ярко. В лабораториях России, Нидерландов, Италии, США, Чехии и Японии были обнаружены и разработаны методы применения СИД для разделения и накопления редких и короткоживущих изотопов и ядерных спиновых изомеров молекул в ситуациях, когда пасуют другие способы. Существуют веские основания говорить о важной роли эффекта СИД в астрофизике – в феномене так называемых химически пекулярных звезд и при формировании протопланетного облака в солнечной системе.

«Квантовая теория твердого тела» и «Кинетические эффекты в твердых телах» являются общими курсами с кафедрой физики полупроводников и необходимы для любого студента, готовящегося к исследованиям оптических свойств конденсирован-

ного состояния вещества. Излагаются динамика решетки, электронные спектры твердых тел, физика нормальных металлов, роль электрон-фононного взаимодействия, электрон-электронное взаимодействие, кинетические эффекты в магнитном поле, разогрев электронов и фононное увлечение.

«Нелинейная оптика» включает в себя изложение тем о нелинейных аналогах полного внутреннего отражения и явления Брюстера, о явлении пространственной синфазности (синхронизма), трехволновом стационарном взаимодействии в квадратичной нелинейной среде и параметрическом усилении в нелинейной среде, спонтанной параметрической люминесценции. Рассматривается физика важных для приложений явлений оптического выпрямления, нелинейного просветления среды, вынужденного комбинационного рассеяния, распространения световых пучков и волновых пакетов в нелинейных диспергирующих средах, самофокусировки света, распространения света в оптических волноводах, оптической бистабильности. Отдельно разбираются когерентные вынужденные нелинейные процессы – оптическое эхо, динамическая голография и обращение волнового фронта.

«Статистические свойства лазерного излучения» содержат краткие основы классической стохастической оптики. Основная часть материала посвящена квантовой оптике. Излагаются квантовая теория фотоотчетов Глаубера и вытекающее из нее важнейшее понятие когерентного фотонного состояния (именно эти результаты были отмечены Нобелевской премией 2005 г.). Аппарат когерентных состояний применяется далее для решения выведенного квантового кинетического уравнения для колебательной моды поля в пассивном резонаторе. Полученный результат обобщается до простейшей квантовой модели лазера, позволяющей объяснить основные статистические свойства лазерного излучения. Вводятся так называемые «одетые поля» состояния двухуровневого атома. На этой основе рассматриваются явления коллапса нутаций и необычные свойства статистики испусканий световых квантов при резонансной флуоресценции атома.

«Современные проблемы квантовой оптики» продолжают предыдущий спецкурс и отражают в основном новейшие тенденции. Материал в значительной степени опирается на журнальные публикации и наиболее под-

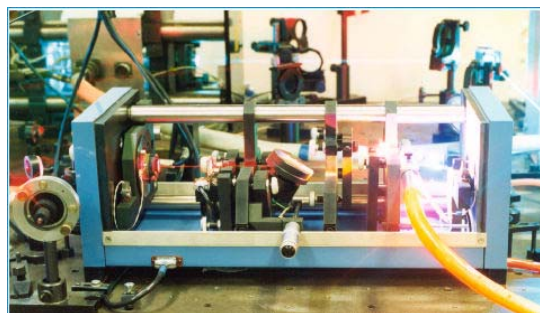
вержен ежегодной модификации. Среди устоявшихся тем излагаются физика «сжатого света», статистика поляризованного излучения и поляризация света, скрытая в шумах, важнейшее для квантовой информатики понятие «зацепленных» состояний. Выводится неравенство Белла, и рассматриваются способы его проверки методами квантовой оптики. Рассмотрена связь лоренц-инвариантности и локальности в квантовой механике, запрета на «клонирование» квантовых состояний и запрета «сверхсветового телеграфа». Излагаются наиболее важные понятия и процессы квантовой информатики: телепортация квантовых состояний, «плотная кодировка», секретный обмен ключом (то, что не совсем верно называется «квантовой криптографией») и идея квантового компьютера. Студенты знакомятся с основными квантовыми алгоритмами: алгоритмом Дойча и Дойча–Джозы, алгоритмом Гровера (поиск в неупорядоченной базе данных), квантовым преобразованием Фурье и алгоритмом Саймона (поиск периода функции). Рассмотрена проблема программируемости квантового компьютера.

Последние шесть спецкурсов читаются для студентов первого года обучения в магистратуре.



По своей структуре процесс обучения на кафедре неотделим от научного поиска. Более 20 лет назад выпускниками кафедры была создана и ныне успешно функционирует лаборатория лазерных систем НГУ (ЛЛС) для разработки, исследования и изготовления непрерывных перестраиваемых лазеров для применений в физических, химических и медицинских исследованиях. На

снимке ее глава – выпускник 1982 г. С. М. Кобцев. В 2005 г. компания «Техноскан», созданная при ЛЛС, поставила лазер в Университет Мэрилэнда (США) по заказу проф. В. Филлипса – лауреата Нобелевской премии 1997 г. за работы по охлаждению атомов. Лазерная аппаратура, созданная в ЛЛС, успешно работает во многих крупнейших научно-исследовательских организациях России, в числе которых ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН, МФТИ, ИОФ РАН, ИПФ РАН, ВНИИОФИ, ИФП СО РАН, ИАиЭ СО РАН и др. Мощные одночастотные Ti:Sapphire-лазеры лаборатории лазерных систем широко используются для решения задач, связанных с охлаждением атомов, во многих зарубежных университетах (Станфордском, Пенсильванском, университете Париж-13, в институте передовых технологий фирмы Samsung). На снимке ниже – образец лазера на органических красителях, созданного в ЛЛС.

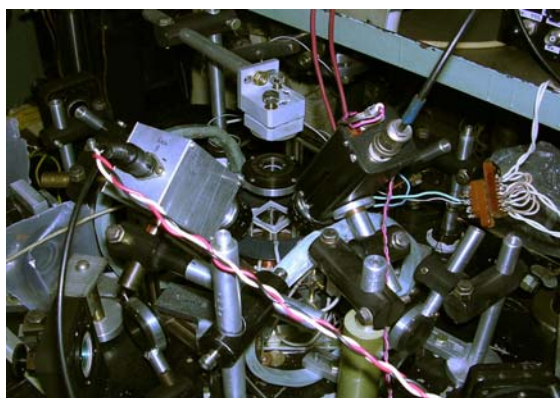


В настоящее время чрезвычайно актуальны лазерные способы охлаждения и удержания атомов. Помимо того, что это путь к получению необычных бозеконденсированных состояний вещества (когда весь конденсат можно рассматривать как единый макроскопический квантовый объект), исследования холодных атомов дают уникальную возможность получить знания о деталях взаимодействия атомов между собой.

Сравнительно недавно появились соответствующие устройства, магнитооптические ловушки (MOT), в которых охлаждение и захват атомов осуществляются при совместном действии системы шести лазерных пучков и магнитного поля сложной конфигурации. Охлажденные атомы удерживаются в области пересечения пучков. Скорость их всего около 10 см/с, что на четыре порядка меньше, чем при комнатной температуре. Число удерживаемых атомов $\sim 10^8$. Это вполне достаточно для проведения

над ними тонких спектроскопических измерений.

МОТ вместе с системой источников и системой контроля представляет собой сложное устройство. На пространстве России восточнее Урала есть только две ловушки. Одна из них (на верхнем снимке хорошо видны катушки Гельмгольца, создающие магнитное поле в ловушке) создана в ИАиЭ СО РАН профессором кафедры П. Л. Чаповским, а другая – в ИФП СО РАН выпускником кафедры д-ром физ.-мат. наук И. И. Рябцевым (показана ниже). Окна ловушки прямоугольной формы, выполнены из кварцевых пластин.



Сотрудники и студенты кафедры включены в весьма актуальные исследования по поиску новых нелинейно-оптических и активных сред, схем и режимов генерации, преобразования оптического излучения с целью создания новых лазеров, а также для применения этих лазеров и сред в квантовой электронике, медицине, в устройствах обработки, передачи и хранения информации и т. д. Например, сверхбыстрое нелинейно-оптическое преобразование сигналов базируется на явлениях нелинейной оптики, которые происходят в средах с показателем преломления и поглощения, зависящих от

интенсивности и поляризации излучения. Для эффективного преобразования сигналов необходимы среды, обладающие одновременно высокими и малоинерционными (время отклика менее 1 пс) нелинейно-оптическими коэффициентами, термической и фотохимической стабильностью и рядом других свойств оптических сред.

В этой связи в последнее время наноструктурные материалы типа полупроводниковых квантовых ям и точек, полисопряженных полимеров, фуллеренов и т. д. становятся в центре внимания исследователей из-за их уникальных оптических свойств, обусловленных размерностью и дискретностью таких систем. К числу подобных объектов можно отнести фрактальные металлические кластеры, которые способны поддерживать различные плазменные моды, что приводит к высокой локализации поля световой волны и, таким образом, к значительному усилению оптических откликов. Эти плазмонные наноструктуры действуют подобно наномантеннам, аккумулируя энергию электромагнитного поля в маленьких областях на размерах порядка нескольких нанометров.

К другому классу наноматериалов относится группа агрегатов молекул красителей, так называемых J-агрегатов цианиновых красителей. Их агрегация отличается от других и связана с появлением новой, очень узкой полосы поглощения, смещенной в низкочастотную сторону относительно полосы поглощения мономера. Это обстоятельство делает оптические свойства данных объектов уникальными. Недавние теоретические и экспериментальные работы показали, что молекулярные J-агрегаты обладают гигантской резонансной нелинейно-оптической кубической восприимчивостью при субпикосекундных временах релаксации нелинейно-оптического отклика и являются перспективными материалами для фотоники.

В настоящее время наблюдается значительный интерес к созданию и исследованию фотонно-кристаллических структур. Фотонные кристаллы представляют целый класс искусственных структур с периодическим изменением диэлектрической проницаемости в одно, двух и трех измерениях, в которых запрещено распространение электромагнитного излучения с длинами волн порядка периода структуры. В основе приложений фотонных кристаллов лежат две

концепции – контроль над спонтанным излучением и локализация света. По существу, применение ФК для создания различных устройств управления светом – это новая парадигма, поскольку такие фотонно-кристаллические структуры могут управлять светом подобно тому, как обычные кристаллы делают это с электронами. В то же самое время фотонные кристаллы открывают новые возможности для фундаментальных исследований процессов, включающих взаимодействие излучения с веществом при новых условиях.

Краткий перечень тематики теоретических и экспериментальных исследований сотрудников, бывших и нынешних студентов кафедры и УНЦ «Квантовая оптика» таков:

- светоиндуцированная газовая кинетика;
- исследование лазерных способов охлаждения и удержания атомов и спектроскопии холодных атомов;
- лазерная модификация макромолекул и поверхностей;
- коллективное рассеяние света;
- нелинейная оптика кластеров, фотонных кристаллов, молекулярных J-агрегатов и коллоидных агрегатов;
- разработка уникальных лазеров на красителях;
- лазерная спектроскопия сверхвысокого разрешения;

– разработка внутррезонаторных оптических компонент для управления модовыми и поляризационными характеристиками лазеров;

– исследование волоконных лазеров (на снимке рядом с таким лазером студент А. Исмагулов);



– использование лазерной спектроскопии для изучения фундаментальных свойств вещества;

- нелинейная спектроскопия атмосферы;
- нелинейная оптическая спектроскопия поляронов;
- основания квантовой механики и квантовой теории информации;
- физика ионных лазеров;
- нелинейная спектроскопия низкотемпературной плазмы;
- интегральная оптика, голография.