

Учебно-методическая статья

УДК 535

DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-1-142-149

## Кафедра квантовой оптики физического факультета Новосибирского государственного университета

Анатолий Михайлович Шалагин <sup>1</sup>  
Леонид Вениаминович Ильичев <sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Институт автоматизации и электрометрии  
Сибирского отделения Российской академии наук  
Новосибирск, Россия

<sup>1,2</sup> Новосибирский государственный университет  
Новосибирск, Россия

<sup>1</sup> shalagin@iae.nsk.su, <https://orcid.org/0000-0002-9127-2882>

<sup>2</sup> leonid@iae.nsk.su, <https://orcid.org/0000-0003-3089-4861>

### Аннотация

Представлена информация о кафедре квантовой оптики Новосибирского государственного университета. Кратко описана история создания кафедры ее основателем членом-корреспондентом РАН Сергеем Глебовичем Раутианом, описаны основные направления подготовки студентов и их связь с научными исследованиями преподавателей и студентов кафедры.

### Ключевые слова

физика лазеров, нелинейная спектроскопия, терагерцовая спектроскопия, нанофотоника, волоконная оптика

### Для цитирования

Шалагин А. М., Ильичев Л. В. Кафедра квантовой оптики // Сибирский физический журнал. 2022. Т. 17, № 1. С. 142–149. DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-1-142-149

## Quantum Optics Department of the Physics Department at Novosibirsk State University

Anatoliy M. Shalagin <sup>1</sup>, Leonid V. Ilchev

<sup>1,2</sup> Institute of Automation and Electrometry  
of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences  
Novosibirsk, Russian Federation

<sup>1,2</sup> Novosibirsk State University  
Novosibirsk, Russian Federation

<sup>1</sup> shalagin@iae.nsk.su, <https://orcid.org/0000-0002-9127-2882>

<sup>2</sup> leonid@iae.nsk.su, <https://orcid.org/0000-0003-3089-4861>

### Abstract

There presented an information on the department of Quantum optics of the Novosibirsk State University. The brief history of the Department since its foundation by the corresponding member of the Russian Academy of Sciences, Sergei G. Rautian, and main educational directions are described along with their relations to scientific research of teachers and students of the Department.

### Keywords

laser physics, nonlinear spectroscopy, THz spectroscopy, nanophotonics, fiber optics

### For citation

Shalagin A. M., Ilchev L. V. Quantum Optics Department of the Physics Department at Novosibirsk State University. *Siberian Journal of Physics*, 2022, vol. 17, no. 1, pp. 142–149. (in Russ.) DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-1-142-149

© Шалагин А. М., Ильичев Л. В., 2022

ISSN 2541-9447

Сибирский физический журнал. 2022. Том 17, № 1. С. 142–149

*Siberian Journal of Physics*, 2022, vol. 17, no. 1, pp. 142–149

### Общая характеристика

Заведующий кафедрой:  
академик 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/department/index.php/chairs/ko>

### Из истории

Кафедра квантовой оптики Новосибирского государственного университета (НГУ) основана в 1965 г. выдающимся ученым, членом-корреспондентом РАН Сергеем Глебовичем Раутианом, создателем обширной и широко известной научной школы физиков-лазерщиков в Сибири. 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. С момента создания и до 2002 г. (с перерывом с 1972 по 1977 г.) кафедрой руководил чл.-корр. РАН С. Г. Раутиан. С 2002 г. по настоящее время заведующим кафедрой является ученик С. Г. Раутиана академик РАН Анатолий Михайлович Шалагин.

За время существования кафедра выпустила более 500 специалистов (в среднем 10–12 выпускников в год). Около 25 выпускников получили степень доктора наук, а более 80 защитили кандидатские диссертации. Трое выпускников стали членами РАН. Многие выпускники имеют государственные и академические награды. Выпускники кафедры работают во многих организациях России: Институте автоматки и электрометрии СО РАН, Новосибирском государственном университете, Институте неорганической химии СО РАН, Институте лазерной физики СО РАН, Институте ядерной физики СО РАН, Институте физики полупроводников СО РАН, Институте геологии и геофизики СО РАН, Институте оптики атмосферы СО РАН, Институте физики им. Л. Киренского СО РАН, Конструкторско-технологическом институте научного приборостроения СО РАН, Институте химической кинетики и горения СО РАН. Многие выпускники успешно трудятся в научных организациях дальнего зарубежья (США, Великобритания, Германия, Швеция и др.).



Член-корреспондент РАН  
С. Г. Раутиан



Академик РАН  
А. М. Шалагин

### Кадровый состав

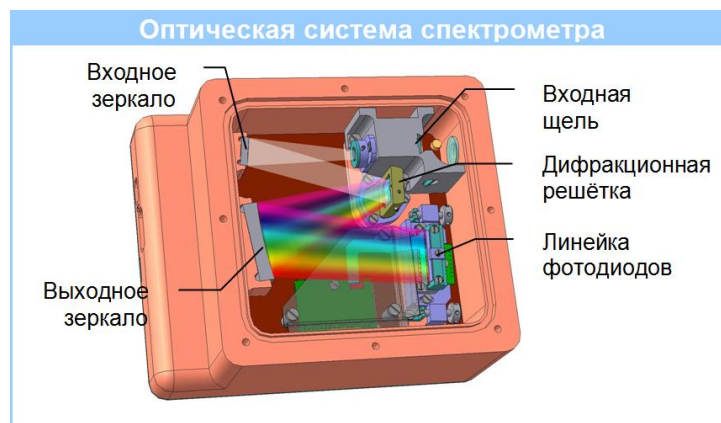
Шалагин Анатолий Михайлович, зав. кафедрой, академик, д-р физ.-мат. наук, проф.  
Ильичев Леонид Вениаминович, зам. зав. кафедрой, д-р физ.-мат. наук, проф.  
Бабин Сергей Алексеевич, чл.-корр. РАН, д-р физ.-мат. наук, проф.  
Бражников Денис Викторович, канд. физ.-мат. наук, доц.  
Ватник Илья Дмитриевич, канд. физ.-мат. наук, ассистент  
Каблуков Сергей Иванович, д-р физ.-мат. наук, ст. преп.  
Смирнов Сергей Валерьевич, канд. физ.-мат. наук, доц.  
Томилин Владимир Александрович, канд. физ.-мат. наук, ст. преп.

Трунов Владимир Иванович, канд. физ.-мат. наук, доц.  
Французов Павел Анатольевич, канд. физ.-мат. наук, ст. преп.

### Специализация

«Оптические измерения» – первый из спецкурсов, с которым знакомятся студенты третьего года обучения, поступившие на кафедру квантовой оптики. В рамках курса слушатели приобретают базовые знания о технике оптического эксперимента, методах, позволяющих исследовать и описывать свойства света. При этом акцент ставится на понимание физики, что позволит чувствовать себя уверенно в лаборатории любого уровня оснащённости.

Спецкурс разделен на несколько частей, посвященных измерениям каждого из параметров электромагнитной волны. В первую очередь рассматриваются измерения интенсивности излучения с помощью измерительных тепловых, болометрических, фотоакустических приемников и исследование ее динамики с помощью полупроводниковых или фотоэлектронных датчиков. Вторая часть посвящена измерениям пространственного распределения интенсивности: использованию полупроводниковых КМОП и ПЗС матриц и построению изображений на них. Рассматривается подход матричной оптики, и строится описание основных оптических приборов – микроскопов и телескопов. Отдельное внимание уделяется анализу искажений, вносимых при построении изображений. Третья часть посвящена анализу спектра излучения. Здесь рассматриваются как классические спектральные приборы, так и более молодые методы: сканирующие интерферометры, Фурье-спектрометрия, спектрометрия оптического смещения. В этой же части рассматриваются способы измерения пространственного и временного распределения фазы излучения. Отдельный раздел курса посвящен измерению поляризационных свойств электромагнитной волны. Наконец, рассматриваются и самые современные методы и приборы, появившиеся в последние десятилетия – оптические векторные анализаторы, автокорреляторы частотно-временного стробирования, оптические рефлектометры и т. д.



Спектрометр «Колибри-2», разработанный «ВМК-оптоэлектроника»  
совместно с сотрудниками ИАиЭ СО РАН  
Spectrometer 'Colibri-2' designed in 'VMK-optoelectronics'  
in collaboration with IA&E SB RAS

Параллельно с изучением физических принципов измерений, студенты третьего года осваивают оптические экспериментальные методы в научных лабораториях Института автоматизации и электротехники СО РАН и других институтов.

Курс лекций «Физика лазеров» дает студентам знания об основных физических процессах, обеспечивающих лазерную генерацию: о вынужденном излучении, усилении и поглощении света, об обратной связи в лазерах и потерях в резонаторе, 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. 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 и оптоволоконные лазеры.

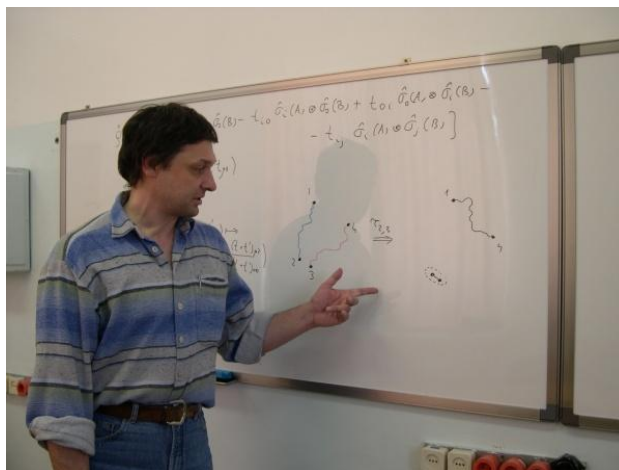
Курс лекций «Физическая оптика» посвящен основам физики распространения электромагнитных волн оптической области спектра в однородных и неоднородных, изотропных и анизотропных средах. Прежде всего излагается физика плоских волн в однородной изотропной среде, отражение и преломление волн на плоской границе, распространение волн в неоднородных средах. Изучается явление дифракция. Значительное внимание уделено понятиям и явлениям кристаллооптики. Во второй части курса рассматриваются эффекты, связанные с молекулярным рассеянием света и уширением спектральных линий, коллапсом спектральных структур, а также элементы статистической оптики. Чтение лекций сопровождается семинарами, чрезвычайно способствующими активному усвоению материала.

В курсе «Спектроскопия» анализируется систематика спектров многоэлектронных атомов, периодической системы элементов, рассматриваются теория сверхтонкой структуры спектральных линий, соотношения интенсивностей спектральных линий и правила отбора для дипольного излучения. Изучаются влияние эффектов 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.

Курс «Нелинейная спектроскопия» базируется на основах квантовой механики. Центральной задачей курса является задача о взаимодействии излучения с квантовой системой (в простейшем случае двухуровневой). Исходно это взаимодействие описывается уравнением Шрёдингера. Далее в материалах лекций использован аппарат, ставший традиционным в области нелинейной спектроскопии. Это аппарат, основанный на кинетических уравнениях для матрицы плотности. Из всего многообразия результатов нелинейной спектроскопии в материал лекций отобраны только те, которые прошли проверку временем и стали составлять ее фундамент. Кроме того, материал формировался с учетом максимальной доступности для усвоения студентами. Фактически для понимания материала лекций вполне достаточно знаний основ квантовой механики. Овладев теми методами и подходами, которые изложены здесь, студент вполне будет способен воспринять углубленные и расширенные знания о предмете, которые содержатся как в рекомендованной литературе, так и в свежих научных публикациях. Кроме студентов физических специальностей, представленный материал может быть полезным для аспирантов и молодых научных сотрудников, специализирующихся в области оптики, спектроскопии и лазерной физики.

Курсы лекций «Основы квантовой оптики», «Современные проблемы квантовой оптики» и «Обратная связь в квантовой оптике». Квантовая оптика есть основа многих перспективных технологий завтрашнего и послезавтрашнего дня в сверхточных измерениях, коммуникации, в сфере защиты информации и новых способов ее обработки. Все эти направления используют необычные свойства квантового мира, зачастую не укладывающиеся в рамки традиционной интуиции и «здравого смысла» классической физики. В рамках квантовой оптики сформировалась так называемая инженерия квантовых состояний. Она нацелена на изучение и разработку методов приготовления состояний излучения, не имеющих классического

аналога, таких как «кошки Шрёдингера» или «сжатый» свет, для нужд прикладной и фундаментальной квантовой метрологии. В частности, такие состояния предполагается использовать в будущих этапах модернизации гравитационно-волновых детекторов LIGO, Virgo и KAGRA. В рамках квантовой инженерии появились также революционные методы оперирования с отдельными атомами и молекулами, отмеченные Нобелевской премией 2012 г.



Доктор физико-математических наук  
Л. В. Ильичев

Современная подготовка физиков-оптиков на уровне магистратуры и аспирантуры невозможна без их основательного знакомства с новыми перспективными направлениями в квантовых технологиях. В свою очередь, создание полноценных учебных курсов такого рода требует активной профессиональной исследовательской работы преподавателей в данной области. Именно так поставлено преподавание на кафедре квантовой оптики, где ведется теоретический поиск новых подходов в квантовой метрологии и управлении квантовыми системами, читается ряд магистерских и аспирантских курсов («Основы квантовой оптики», «Современные проблемы квантовой оптики», «Дополнительные главы квантовой оптики», «Обратная связь в квантовой оптике»).

Одни из наиболее эффективных методов теории управления основаны на использовании обратной связи. Помимо самой управляемой системы, данные алгоритмы требуют наличия устройства, извлекающего информацию из системы путем измерения определенных ее параметров. Второй необходимой составляющей является контроллер, который на основании данных, полученных на шаге измерения, непосредственно осуществляет изменение параметров в соответствии с выбранной стратегией управления (например, для получения заранее заданного состояния системы).



Кандидат физико-математических наук  
В. А. Томилин

С развитием технологий возникла возможность проводить эксперименты с системами, имеющими существенно квантовые свойства. При этом приобрели актуальность задачи управления их эволюцией. В приложениях важную роль играют так называемые гибридные квантово-классические системы, состояние которых описывается, наряду с квантовыми степенями свободы, еще и некоторыми классическими параметрами, например фазами взаимодействующих с системой оптических полей или ориентациями поляризационных оптических элементов. В цикле работ, выполненных старшим преподавателем кафедры В. А. Томили-

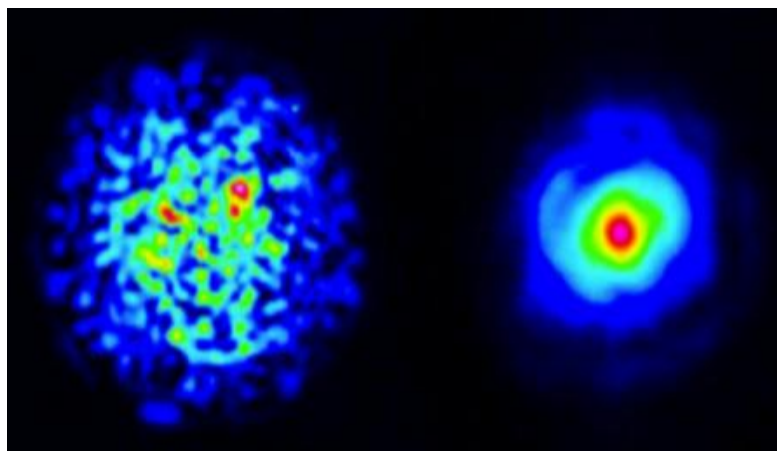
ным под руководством профессора Л. В. Ильичёва, был сформулирован набор эффективных методов управления гибридными системами, основанных на скачкообразных переключениях классических параметров. Инициаторами таких переключений выступают генерируемые квантовой системой случайные события (например, регистрации испущенных спонтанных квантов) или так называемая когерентная обратная связь. В настоящее время работа в этом направлении продолжается; в частности, разрабатываются новые подходы, основанные на управляемой модификации самого процесса измерения, проводимого над системой («распутывании» операции измерения). Эти исследования в перспективе могут привести к созданию нового класса квантовых кибернетических устройств.

Курс лекций «Кинетические проблемы нелинейной спектроскопии» является продолжением и развитием курса «Нелинейная спектроскопия». В основном он посвящен физическим процессам, реализующимся в газовых средах и влияющим на взаимодействие лазерного излучения с газом. Эти процессы порождены столкновениями частиц газа друг с другом, а их влияние, как и должно быть, проявляется двояко. Во-первых, изменяются характеристики излучения (энергетические и спектральные), возможно возникновение генерации в новых спектральных областях. Во-вторых, излучение меняет движение частиц газа, а также под действием излучения меняется состояние самой газовой системы. Рассмотрение упомянутых физических процессов основано на решении квантовых кинетических уравнений для матрицы плотности с интегралом столкновений. Излучение в условиях большого доплеровского уширения непременно создает существенно неравновесные распределения по скоростям на «рабочих» уровнях частиц (атомов или молекул). Столкновения в той или иной степени модифицируют эти распределения, что ярко проявляется в спектрах (поглощения, усиления, спонтанного испускания) излучения. Этот же факт (формирование неравновесных распределений на уровнях) приводит, как оказывается, к неожиданным изменениям состояния самой газовой среды, к серии так называемых светоиндуцированных газокинетических явлений, открытых сотрудниками и выпускниками кафедры. В их основе лежит своеобразное несиловое воздействие лазерного излучения на смесь газов, приводящее к неравновесности макроскопических характеристик газовой системы (демон Максвелла). Самым ярким из них является светоиндуцированный дрейф (СИД). Он состоит в возникновении относительного движения (дрейфа) газового компонента, взаимодействующего с излучением, относительно буферного компонента. Скорость дрейфа в оптимальных условиях сопоставима со скоростью звука.

Курс «Волоконная оптика» состоит из двух частей, каждая из которых рассчитана на семестр. Волоконная оптика – современная быстроразвивающаяся область физики, которая становится неотъемлемой частью физического и инженерного образования в связи с ее широким применением как в научных исследованиях, так и в повседневной жизни: в оптической связи и системах широкополосного доступа, сенсорике и информационно-измерительных системах, лазерной технике и лазерных технологиях. В первой части курса лекций рассматриваются основы волоконной оптики: устройство и принцип действия волоконного световода, распространение света в рамках геометрической оптики, волновое уравнение и моды световода, качественные количественные характеристики (потери, дисперсия и нелинейность) и типы волоконных световодов, ввод и вывод излучения из световодов, теория связанных мод и волоконные ответвители, объединители и интерферометры, теория, методы изготовления и характеристики волоконных брэгговских решёток (ВБР) и других волоконно-оптических компонент, основы волоконных лазеров. Во второй части рассматриваются вопросы нелинейной волоконной оптики и волоконно-оптических систем, в частности нелинейное уравнение Шрёдингера и различные режимы распространения коротких импульсов в волоконных световодах в присутствии керровской нелинейности, волоконные лазеры с синхронизацией мод и распределенной обратной связью, нелинейные эффекты вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) и Манделъштама – Бриллюэна (ВРМБ), волоконные лазеры на основе ВКР и ВРМБ, генерация гармоник в волокне, волоконные сенсорные сис-



темы на основе ВБР, комбинационного, рэлеевского и бриллюэновского рассеяния, волоконно-оптические линии связи со спектральным уплотнением каналов, перспективные системы связи.



Нелинейное преобразование многомодового пучка со спекл-картиной интерференции мод в квазиодномодовый пучок при распространении в многомодовом градиентном световоде  
Non-linear transformation of a multimode beam with speckle interference structure into a quasi-single-mode beam in the course of its propagation in a multimode gradient wave-guide

Курс «Нелинейная фотоника» посвящен основам нелинейной оптики и фотоники, теории поляризации среды в сильных магнитных полях и фазового синхронизма. Включает в себя изложение тем о нелинейных аналогах полного внутреннего отражения и явления Брюстера, о явлении пространственной синфазности (синхронизма), о трехволновом стационарном взаимодействии в квадратичной нелинейной среде и параметрическом усилении в нелинейной среде, о явлениях 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 и оптических волокнах. Во второй части курса рассматриваются вопросы генерации методами нелинейной оптики лазерного излучения высокой мощности от фемтосекундной до аттосекундной длительности в различных спектральных диапазонах, включая терагерцовый, рентгеновский диапазоны и гамма-диапазон.

### Заключение

Студенты первого и второго курсов НГУ при выборе дальнейшей образовательной траектории имеют возможность ознакомиться с информацией о кафедре квантовой оптики на ее сайте. Более детальное ознакомление с возможностями кафедры можно осуществить в день «открытых дверей», который проводится ежегодно в апреле-мае и представляет собой экскурсии в исследовательские лаборатории НГУ, ИАиЭ СО РАН и ИФП СО РАН, где ученые подробно рассказывают об актуальных научных исследованиях по лазерной тематике и демонстрируют действующее научное оборудование. Как правило, на этих экскурсиях студент принимает решение обучаться на данной кафедре и выбирает для себя ту научную группу, в которой он хотел бы проходить научную практику.

### Информация об авторах

**Анатолий Михайлович Шалагин**, доктор физико-математических наук, профессор, академик РАН

**Леонид Вениаминович Ильичев**, доктор физико-математических наук, профессор

### Information about the Authors

**Anatoliy M. Shalagin**, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Professor, Academician of RAS

**Leonid V. Ilichev**, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Professor

*Статья поступила в редакцию 25.05.2021;  
одобрена после рецензирования 01.09.2021; принята к публикации 01.09.2021  
The article was submitted 25.05.2021;  
approved after reviewing 01.09.2021; accepted for publication 01.09.2021*