

**СПРАВКА**  
**об учебно-научной деятельности**  
**кафедры квантовой электроники в период с 2017 по 2021 г.г.**

**ИСТОРИЧЕСКАЯ СПРАВКА. КАДРОВАЯ ПОЛИТИКА.**

Кафедра квантовой электроники ведет научно-педагогическую деятельность сорок три года. Она была создана академиком Л.В.Келдышем в 1978 г. и до 2001г. имела название - «кафедра квантовой радиофизики». Кафедра была сформирована в результате реорганизации двух кафедр отделения радиофизики физического факультета (ОРФ) – кафедры волновых процессов и кафедры общей физики для мехмата. Основателем первой из них был академик Р.В.Хохлов, который руководил этой кафедрой до своей трагической гибели в 1977 г. Заведующим второй был профессор С.А.Ахманов, ближайший сподвижник Р.В.Хохлова в создании отечественной школы нелинейной оптики. В процессе реорганизации были созданы две кафедры – общей физики и волновых процессов (ОФ и ВП) под руководством С.А.Ахманова и квантовой радиофизики (КРФ), которой до 2001 года руководил академик Л.В.Келдыш. (С 2001 г. по настоящее время заведующим кафедрой является профессор В.И. Панов). В первые годы существования кафедры её научные направления охватывали спектр исследований в области физики лазеров и изучения физических явлений, протекающих в поле лазерного излучения. В последующем кафедра направила свои основные научные интересы в область физики конденсированных сред и физики наноструктур, нелинейной и квантовой оптики, изучения проблем взаимодействия электромагнитного излучения с веществом и нанофотоники, а также квантовой обработки и передачи информации. В последнее время значительное внимание на кафедре уделяется продвижению фотонных и квантовых технологий, которые позволяют качественно изменить представление о скорости и защищенности передаваемой информации, а также развитию и продвижению в практику новейших достижений биофотоники для исследования фундаментальных процессов в живых системах. С целью подготовки специалистов в этих перспективных направлениях в отчетном периоде основная магистерская программа кафедры «Квантовая электроника и квантовая оптика» была дополнена еще тремя программами, две из которых: «Квантовые вычисления» и «Прикладная квантовая связь» направлены на подготовку студентов в области квантовых технологий, осуществляемую совместно с Центром Квантовых Технологий, научным руководителем которого является профессор кафедры С.П. Кулик. Третья магистерская программа была создана в 2021 г. на базе междисциплинарной научно-образовательной Школы «Фотонные и квантовые технологии. Цифровая медицина» под названием «Биомедицинская фотоника», которая предназначена для подготовки квалифицированных кадров, способных продвигать, тестировать и внедрять современные методы фотоники в медицину.

Теоретические и экспериментальные исследования, представленные на кафедре, отвечают передовым тенденциям развития этих научно-технологических направлений, что позволяет осуществлять углубленную подготовку студентов по всем имеющимся на кафедре научным направлениям. В последние годы теоретические и экспериментальные исследования кафедры сбалансированы. Проводится углубленная подготовка студентов по теоретическим основам квантовой электроники – физике конденсированного состояния, взаимодействию излучения с веществом, а также подготовка в областях экспериментальной лазерной физики: нелинейной и квантовой оптике, лазерной спектроскопии, физике наносистем и фотонно-кристаллических сред, нанофотонике, квантовой обработке и передаче информации.

Отчетный 2021 год ознаменован 90-летием со дня рождения основателя кафедры академика Л.В. Келдыша. С целью признания его заслуг как выдающегося ученого и организатора науки Российская Академия Наук учредила золотую медаль имени Л.В. Келдыша, присуждаемую РАН российским ученым за выдающиеся работы в области физики конденсированного состояния. Первое вручение этой медали приурочено к этой юбилейной дате.

Будучи физиком - теоретиком, Леонид Вениаминович всегда интересовался работой экспериментаторов и поддерживал создание новых перспективных экспериментальных направлений при организации научных групп. На начальном этапе формирования кафедры были привлечены сотрудники кафедры волновых процессов, которые и составили в дальнейшем основу коллектива кафедры квантовой электроники. Они во многом определили стиль её работы и традиции. Наряду с основателем кафедры Л.В. Келдышем, в первый состав кафедры вместе со своими лабораториями и группами вошли Д.Н. Клышко, В.В. Фадеев, Ю.А. Ильинский, А.Н. Пенин, В.С. Днепровский, С.П. Чернов. В момент образования (1978г.) на кафедре работали 27 сотрудников. К настоящему времени из стартового научно-педагогического состава на кафедре остался лишь один сотрудник, профессор В.В. Фадеев. Следует отметить сотрудников следующих поколений: П.В. Елютина, О.А. Акципетрова, Т.В.Мурзину, сыгравших ключевую роль в подготовке молодых кадров на кафедре. В результате на смену ветеранам пришли их талантливые ученики и ученики их учеников, которые сформировали на кафедре новые научные направления, возглавили лаборатории и научные группы. Благодаря им продолжают развиваться традиции кафедр волновых процессов и квантовой электроники. Это: профессора С.П. Кулик, А.А. Федянин, А.Н. Рубцов, Г.Х Китаева, доктора наук Т.В. Мурзина, А.И.Орешкин, Н.С. Маслова, кандидаты наук П.А. Прудковский, Т.А. Доленко, Е.А. Ширшин, С.С. Страупе и др. Кроме того, кафедра стимулирует выпускников кафедры на поиск и формирование собственных научных направлений.

Кадровая политика кафедры, направленная на поддержку талантливой молодёжи, была и остаётся ключевым фактором, который обеспечивает постоянный прогресс в педагогической и научной деятельности кафедры. За время существования кафедры структура ее научной тематики непрерывно изменялась, оставаясь при этом в русле современных тенденций развития основных научных и технологических направлений деятельности кафедры.

За последние пять лет численный состав кафедры практически не изменился, однако, так же, как и в предшествующий период, постоянно изменяется распределение ее кадрового состава, преимущественно за счет притока молодежи. В 2016 г. кафедра состояла из **29** сотрудников, сейчас в ее состав входит **32** сотрудника, из них:

- профессорско-преподавательский состав – **10** человек:  
**6** профессоров, **4** доцента (с 2016 г. количество профессоров и доцентов не изменилось);
- научный состав – **19** человек (в 2016 г. было **16** человек):  
**2** ведущих научных сотрудника, **8** старших научных сотрудников, **3** научных сотрудника, **4** младших научных сотрудника, **1** вед. инж, **1** физик (в 2016 г. было **2** внс, **6** снс, **3** нс, **5** мнс);
- вспомогательный состав – **3** человека (в 2016 г. было **3** человека).

Кроме постоянных сотрудников, кафедрой в отчетный период (ежегодно) привлекались для выполнения работ, ведущихся в рамках НИР, ОКР и Мегагранта «Нелинейная и экстремальная нанофотоника» по направлениям квантовой оптики, квантовых технологий и нанофотоники, около 100 «внебюджетных» научных сотрудников, инженеров и технологов.

В настоящий момент средний возраст учебно-научного состава кафедры – **46** лет (в 2016 г. он также составлял **46** лет, а в 2011 г. - **45** лет), причём сейчас 69 % сотрудников кафедры имеют возраст до 50 лет (в 2016 г. таких сотрудников было 64%, а в 2011 г. 65%), т.е. за последние годы кафедра по формальным показателям практически не постарела. К сожалению, в последний отчетный период эти показатели связаны не только с приходом молодых кадров, но и с трагическими событиями. 11 ноября 2016 года ушел из жизни основатель кафедры Л.В. Келдыш и покинула кафедру талантливый физик д.ф.м.н. М.В. Чехова, а в предыдущий отчетный период кафедра потеряла замечательных сотрудников и талантливых ученых: профессора А.Н.Пенина, доцента А.А.Никулина и снс С.В.Савинова, которые внесли значительный вклад в развитие кафедры.

Вместе с тем кафедра многие годы стабильно представляет собой сбалансированный коллектив высококвалифицированных, активно и успешно работающих сотрудников, сочетающих опыт и энергию молодости. При этом «опыт», в основном, олицетворяет уже

следующее поколение выпускников кафедры квантовой электроники, находящееся на пике своей творческой активности, среди которых доктора наук, получившие свои звания на кафедре. Это: - Н.С. Маслова, С.П. Кулик, Г.Х. Китаева, М.В. Чехова, Т.В.Мурзина, А.Н.Рубцов, А.А.Федянин, А.И. Орешкин. Четверо из них: А.Н.Рубцов, А.А.Федянин, С.П. Кулик и Г.Х. Китаева являются профессорами кафедры. За все время существования на кафедре работали и работают известные ученые и талантливые педагоги, среди которых лауреаты Ленинской и Государственной премий, Ломоносовской премии АН СССР, премии Президента РФ в области образования, Международной премии в области нанотехнологий RUSNANOPRIZE, государственной премии «Триумф», премии Ленинского Комсомола и др., а также авторы открытия «Трехфотонное параметрическое рассеяние света».

За последние пять лет состав кафедры пополнился семью молодыми сотрудниками из числа выпускников кафедры.

## УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ РАБОТА

### Курсы лекций

Обучение студентов на кафедре в настоящее время осуществляется по двухступенчатой системе, по направлению "Физика" 03.03.02 (бакалавры) и 03.04.02 (магистры). Образование в магистратуре ведется в рамках четырех магистерских программ: (1) "Квантовая электроника и квантовая оптика, (2) «Квантовые вычисления»; (3) «Прикладная квантовая связь», (4) «Медицинская биофотоника», которая начата – с осени 2021 (материалы по ней не включены в отчетный период).

В соответствии с этими специализациями разработаны системы лекционных курсов кафедры, структура которых представлена в таблицах. Бакалавры в 6 и 7 семестрах выполняют задачи специального физического практикума отделения радиофизики.

Курсы программы объединены в пять блоков. В первый блок (*теория колебаний и волн*) входят общие курсы, знакомящие с основными методами современной теории колебаний и волн. Этот блок преимущественно составляют курсы, традиционно читавшиеся в рамках Отделения радиофизики и электроники ("Теория колебаний", "Теория волн", "Теория нелинейных волн", "Нелинейная динамика"), в результате знакомства с которыми студенты получают представление о современных подходах к задачам в этой области знаний.

Второй блок составляют курсы, отражающие на фундаментальном уровне специфическое направление кафедры - *взаимодействие электромагнитного излучения с веществом*. Это - курсы "Квантовая электроника", "Теоретические основы квантовой радиофизики", "Взаимодействие электромагнитного излучения с веществом". Сюда же входят курсы "Статистическая радиофизика" и "Численные методы", которые необходимы для фундаментального образования специалистов в области квантовой электроники.

В трех блоках - *Оптика*", "*Лазерная спектроскопия*" и "*Теория твердого тела*" - собраны курсы, которые способствуют получению выпускниками кафедры образования в рамках специализации "Квантовая электроника и квантовая оптика" (такие как "Нелинейная оптика", "Экспериментальные методы квантовой электроники", "Основы физики лазеров», "Физические основы лазерной спектроскопии", "Элементарные возбуждения в твердом теле", "Квантовая оптика", "Основы корреляционной спектроскопии" и др.), а также отражающие современные тенденции развития квантовой электроники и оптики ("Оптика неклассических полей", "Корреляционная спектроскопия", "Наноэлектроника и мезоскопия", "Сканирующая зондовая микроскопия и наноэлектроника" и др.). Ряд курсов читается приглашенными преподавателями и научными сотрудниками других факультетов МГУ и институтов.

Современная третья ступень высшего образования – аспирантура; для аспирантов кафедры составлена следующая учебная программа курсов (Таблица 4).

## **СТРУКТУРА СПЕЦИАЛЬНЫХ КУРСОВ КАФЕДРЫ КВАНТОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ**

**Таблица 1. Бакалавры**

№	название	семестр	курс
<b>ТЕОРИЯ КОЛЕБАНИЙ И ВОЛН</b>			
1	Теория колебаний	6	3
2	Нелинейная динамика	7	4
3	Теория волн	7	4
4	Основные модели квантовой радиофизики	8	4
<b>ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ</b>			
5	Экспериментальные методы квантовой электроники	6	3
6	Теоретические модели квантовой радиофизики	8	4
7	Квантовая электроника	7	4
<b>ОПТИКА</b>			
8	Введение в нелинейную оптику	7	4
9	Оптика пространственно неоднородных сред и метаматериалов	8	4
<b>ЛАЗЕРНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ</b>			
10	Физические основы лазерной спектроскопии	7	4
11	Основы физики лазеров	7	4
<b>ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА</b>			
12	Основы физики конденсированного состояния вещества	7	4

(цветом выделены дисциплины профиля)

**Таблица 2. Магистранты, программа «Квантовая электроника и квантовая оптика»:**

№	название	семестр	курс
Современные проблемы физики			
1	Теоретические основы квантовой радиофизики	1	1
2	Элементарные возбуждения в твердом теле	1	1
3	Взаимодействие электромагнитного излучения с веществом	1	1
4	Квантовая оптика	1	1
5*	Корреляционная спектроскопия	1	1
6	Нелинейная оптика	1	1
7	Теория нелинейных волн	1	1
Макроскопические квантовые явления			
8	Макроскопические квантовые явления	2	1
9	Физика наноструктур и мезоскопические явления	2	1
10	Оптика неклассических полей	2	1
11	Физические основы квантовой информации *	2	1
12	Лазерная спектроскопия элементарных возбуждений в твердом теле *	2	1
13	Сканирующая зондовая микроскопия и наноэлектроника	2	1
14	Квантовая теория измерений	2	1
15	Оптическая спектроскопия дисперсных сред *	2	1
15	Современные проблемы нелинейной нанофотоники	3	2

16*	Квантовые вычисления	3	2
17	Основы физики поверхности и современные методы ее исследования	3	2
18	Оптическая микроскопия и наноскопия	3	2
19*	Квантовая криптография	3	2
20	Лазерная спектроскопия высокомолекулярных соединений*	3	2

(цветом выделены дисциплины магистерской программы)

**Таблица 4. КУРСЫ ДЛЯ АСПИРАНТОВ**

1	Физические основы квантовой информации		2 г/о
2	Современные проблемы лазерной физики		2 г/о
3*	Основные модели и методы теоретического исследования электронного транспорта в наноструктурах		2 г/о
4	Физические основы локальных методов исследования нанобъектов и наносистем		2 г/о
5	Лазерные методы генерации и детектирования терагерцового излучения		2 г/о
6	Адаптивные методы анализа данных для решения обратных задач оптической спектроскопии		2 г/о
7*	Современные методы и возможности колебательной спектроскопии		2 г/о
8*	Концепции и методы современной теории конденсированного состояния: равновесные системы		2 г/о

\* - курсы, подготовленные за последние 5 лет

С 2011 года обучение магистрантов на кафедре проводится по программе «Квантовая электроника и квантовая оптика». Она включает в себя 20 дисциплин, 13 из которых – дисциплины магистерской программы (обязательные), остальные относятся к вариативной части. Профессор кафедры А.Н. Рубцов читал общий курс лекций «Введение в квантовую физику» в третьем семестре бакалавриата, семинарские занятия проводились сотрудниками кафедры.

Особое внимание на кафедре уделяется работе со студентами младших курсов. Для знакомства с кафедральными направлениями работ и профориентацией студентов активно используются и курсовые работы 2 курса. В результате значительная часть принимаемых студентов начинает работу на кафедре до срока своего официального распределения.

Кафедра активно использует интернет ресурсы для процесса обучения студентов и аспирантов. На сайте кафедры <http://quantum.phys.msu.ru> выставлены программы и развернутые конспекты большинства читаемых на кафедре лекционных курсов. Сайт кафедры содержит специальную страницу, адресованную студентам 1 – 3 курсов; на ней помещены темы курсовых работ для студентов 2 курса, архив SEMINARIUM'a и ссылка на архив кафедральных олимпиад.

С 2020 года на кафедре обучение магистров проводится в рамках магистерской программы «Квантовые вычисления»; специальные курсы кафедры, читаемые в рамках данной программы, приведены в Таблице 3.

**Таблица 3. Магистранты, программы «Квантовые вычисления» и «прикладная квантовая связь»:**

№	название	семестр	курс
1	Основы квантовой оптики	1	1
2	Введение в квантовую информацию	2	1
3	Линейно-оптические квантовые вычисления	2	1
4	Теория квантовых алгоритмов и вычислительной сложности	3	2
5	Физические модели квантовых вычислений	2	1
6	Программирование квантовых вычислительных систем, современные средства разработки программного обеспечения для специализированных квантовых вычислителей	4	2
7	Моделирование квантовых систем	3	2
8	Компьютерное моделирование квантовых операций и алгоритмов	4	2
9	Введение в квантовые вычисления	1	1
10	Квантовая томография и обработка результатов квантовых измерений	3	2
11	Квантовая криптография	2	2
12	Физика холодных атомов и квантовые вычисления на атомных системах	2	1
13	Управление проектами	3	2
14	Дополнительные главы математики	1	1
15	Избранные главы квантовой механики	1	1
16	Основы системного программирования	2	2
17	Параллельное программирование для высокопроизводительных систем	3	2
18	«Лего» на ПЛИС. Архитектура и методы работы ПЛИС (FPGA)	1	1
19	«Лего» на ПЛИС. Применения ПЛИС (FPGA)	2	1
20	Основы квантовой теории взаимодействия света с атомными системами	3	2
21	Расчет, дизайн и методы изготовления интегрально-оптических компонентов для квантовых вычислительных систем	4	2
22	Квантовая томография и обработка результатов квантовых измерений	4	2
23	Компьютерное моделирование квантовых измерений и квантовой томографии	3	2
24	Квантовая теория рассеяния света холодными атомами	4	2
25	Протоколы квантовой криптографии: от теории к практике		
26	Волоконно-оптические системы связи		
27	Генераторы случайных чисел и физические методы взлома систем квантовой связи		

В настоящее время на кафедре одновременно обучается **94** студента (в 2016 году их было **54**, а в 2011 г. - **35**). Увеличение количества студентов вызвано появлением трех новых магистерских программ по которым студенты обучаются на кафедре. Студенты активно участвуют в научной работе кафедры. За последние пять лет с их участием опубликовано около **50%** статей, входящих в топ 25 (**142**) и сделано более 50% всех докладов. В предыдущий период таких статей было **130** и представлено более 180 тезисов докладов на Всероссийских и Международных конференциях (в 2011 г. их было около 110).

По окончании факультета лучшие студенты поступают в аспирантуру. В настоящее время на кафедре проходят аспирантуру **30** человек (в предшествующий период – 33, в 2011 г. их было 14). За последние пять лет **15** аспирантов защитили кандидатские диссертации (в предшествующий период – 19).

## **Практикум**

Экспериментальная подготовка студентов кафедры осуществляется путем выполнения полного цикла обязательных задач Отделения радиофизики. Основное внимание уделяется выполнению задач Кафедры Квантовой Электроники. В 2018 году вышло учебное пособие «СПЕЦИАЛЬНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО КВАНТОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ» (Под редакцией В.И. Панова и Г.Х. Китаевой). Задачи разделены на четыре раздела, каждый из которых сопровождается введением, в котором кратко изложены теоретические аспекты соответствующих задач. Представленные задачи знакомят студентов с экспериментальными методами исследования в таких практически важных направлениях, как квантовая оптика, физика наносистем и квантовая электроника. Они дают представление об эффектах параметрического рассеяния света, парадоксе Эйнштейна–Подольского–Розена, управляемых классических корреляциях, нарушениях неравенств Белла, квазисинхронных параметрических процессах, о методах диагностики электрофизических параметров наноматериалов, используемых в микроэлектронике и квантовой электронике. Целью практикума является ознакомление студентов и аспирантов с одним из фундаментальных явлений современной нелинейной и квантовой оптики — параметрическим рассеянием света в средах без центра симметрии, ознакомление с методами применения сканирующих зондовых микроскопов — атомно-силового, сканирующего туннельного, оптического ближнего поля, и методом оптического пинцета. Задачи предназначены для студентов 4го - бго курсов ОРЭ физического факультета МГУ.

### *Задача 1. Параметрическое рассеяние света*

В этой задаче осуществляется знакомство студентов с одним из фундаментальных явлений нелинейной и квантовой оптики - параметрическим рассеянием (ПР) света в средах без центра инверсии. Цели задачи: получить навыки наблюдения параметрического рассеяния света и рассеяния света на поляритонах. Ознакомиться с методами регистрации спектров параметрического рассеяния света. Получить представление о том, какая информация о рассеивающей среде содержится в спектрах, как связаны характеристики спектров с оптическими и динамическими параметрами рассеивающего объекта. Научиться извлекать необходимую информацию о параметрах рассеивающего объекта из спектров параметрического рассеяния кристаллов ниобата лития, йодата лития и бета-бората бария (ВВО).

### *Задача 2. Параметрическое рассеяние света в квазисинхронных структурах*

Цели задачи: ознакомиться с особенностями квазисинхронных нелинейно-оптических процессов на примере параметрического рассеяния света в периодически поляризованных кристаллах. Получить навыки наблюдения параметрического рассеяния света. Ознакомиться с методами регистрации спектров параметрического рассеяния света. Получить

представление о том, какая информация о характеристиках квазисинхронной структуры содержится в спектрах ПР. Научиться извлекать информацию о периоде пространственной модуляции квадратичной восприимчивости среды и ориентации нелинейной сверхрешетки.

### *Задача 3. Управляемые классические корреляции типа Эйнштейна-Подольского-Розена (ЭПР)*

При выполнении этой задачи студенты знакомятся с такими важными для квантовой оптики концепциями как парадокс Эйнштейна-Подольского-Розена и парадокс Белла. В задаче изучается электронная модель, позволяющая имитировать парную корреляцию случайных дихотомных сигналов типа ЭПР и демонстрировать выполнение неравенств Белла в классической физике. Так называемая “квантовая нелокальность” лишается физических оснований, поскольку демонстрируется действующая классическая радиотехническая модель, для которой характерно наличие управляемых корреляций.

### *Задача 4. Изучение поверхностных наноструктур методом атомно-силовой микроскопии*

Атомно-силовая микроскопия (АСМ) поверхности двумерного массива наноструктур, сформированных на поверхности монокристаллического кремния. Цель работы состоит в изучении основ работы сканирующих зондовых микроскопов на примере изучения двумерных наноструктур методом атомно-силовой микроскопии. Результатом выполнения задачи является получение основных навыков исследования методами АСМ. В ходе выполнения задачи студенты получают представление о возможностях, специфических особенностях и ограничениях этого метода.

### *Задача 5. Ознакомление с работой апертурного сканирующего оптического микроскопа ближнего поля*

Цель работы состоит в изучении основ работы сканирующих оптических микроскопов ближнего поля на примере изучения наноструктур с помощью апертурного микроскопа ближнего поля в конфигурации проходящего света. Применяемое оборудование: экспериментальный сканирующий оптический микроскоп ближнего поля на основе зондового микроскопа Solver PRO47H. Задание: освоить порядок работы на сканирующем оптическом микроскопе ближнего поля, исследовать тестовый образец, получить изображения исследованного образца в режимах измерения топографии и ближнепольной микроскопии

### *Задача 6. Исследование поверхностных наноструктур методом сканирующей туннельной микроскопии*

Цель работы состоит в изучении основ работы сканирующих туннельных микроскопов на примере изучения реконструкции  $7 \times 7$  поверхности кремния Si(111) с помощью сверхвысоковакуумного сканирующего туннельного микроскопа. Применяемое оборудование: Экспериментальный сверхвысоковакуумный сканирующий туннельный микроскоп Omicron. Задание предполагает получение студентами изображения распределения атомов на реконструированной поверхности кремния и его анализ.

### *Задача 7. Квантово-механическое моделирование свойств нанобъектов*

Задача посвящена изучению современных численных методов описания вещества на атомных масштабах, а также на масштабах, переходных к макроскопическим. В рамках данной задачи студенты знакомятся с численными методами квантовомеханического описания атомов, молекул и поверхности твердого тела, а также с методами численного моделирования электронных свойств вещества в конденсированном состоянии и



поверхностных наноструктур на атомном уровне. Цель работы состоит в овладении теоретическими и практическими знаниями в области квантово-механических численных методов расчета электронных свойств наносистем с большим числом атомов на примере компьютерного эксперимента по моделированию атомной и электронной структуры поверхностной реконструкции Ge(111)-с(2x8).

*Задача 8. Оптический захват и манипулирование одиночными микро- и наночастицами в двойном оптическом пинцете*

Цель работы состоит в изучении принципов оптического пинцета и двойного оптического пинцета, изучение физических основ оптического захвата и манипулирования одиночными микро- и наночастицами в водной суспензии. Применяемое оборудование: установка для оптического захвата и манипулирования одиночными микро- и наночастицами (двойной оптический пинцет); оборудование для изготовления оптических микрокувет; оборудование для визуализации оптического захвата. Задание: освоить порядок работы на установке двойного оптического пинцета, осуществить оптический захват одиночной микрочастицы, исследовать возможность трехмерного манипулирования одиночной частицей, осуществить оптический захват пары микрочастиц, исследовать возможность контролируемого изменения расстояния между ними на микроуровне.

Дополнительно для магистров программ «**Квантовые вычисления**» и «**Прикладная квантовая связь**» представлены задачи, при выполнении которых студенты знакомятся с ключевыми эффектами квантовой оптики с упором на приложения в области квантовой информатики. В рамках этого практикума студенты могут выполнять следующие задачи:

*Задача 1. Поляризационные состояния и поляризационные элементы*

В этой задаче студенты знакомятся с описанием поляризационных состояний света при помощи формализма векторов Джонса и Стокса. Осваивают навыки работы с различными поляризационными элементами: поляроиды, поляризационные светоделители, фазовые пластины.

*Задача 2. Проверка нарушения неравенств Белла*

В этой задаче студенты знакомятся с перепутанными поляризационными состояниями пар фотонов. Получают опыт проведения измерений над квантовыми системами, убеждаются в нарушении неравенств Белла, свидетельствующем о принципиально вероятностной природе квантовых систем.

*Задача 3. Интерференция Хонга-Оу-Манделя*

В этой задаче студенты знакомятся с явлением интерференции Хонга-Оу-Манделя, сравнивают ее с однофотонной интерференцией, исследуют связь между спектральными и частотными характеристиками однофотонных и двухфотонных полей.

*Задача 4. Томография квантовых состояний и процессов*

В этой задаче студенты знакомятся с методикой томографии квантовых состояний и квантовых процессов на примере однофотонных поляризационных кубитов. Студенты проводят серию измерений над разными поляризационными состояниями одного фотона и на основе результатов измерений восстанавливают матрицы плотности соответствующих состояний. Затем эти состояния последовательно подаются на вход неизвестного квантового процесса, реализуемого фазовой пластинкой или поляроидом, над выходными состояниями

также производится серия измерений и на основе полученным результатом восстанавливается хи-матрица квантового процесса.

#### *Задача 5. Квантовая криптография*

В этой задаче студенты знакомятся с реализацией систем квантового распределения ключа и квантового генератора случайных чисел. Исследуется зависимость уровня ошибок от величины оптических потерь в канале связи.

#### *Задача 6. Статистика фотонов*

В этой задаче студенты знакомятся с методами измерения статистики фотонов на примере когерентных и тепловых состояний света. Получают опыт измерения статистики фотонов однофотонными детекторами.

#### *Задача 7. Гомодинное детектирование*

В этой задаче студенты знакомятся с квадратурными распределениями когерентных и тепловых состояний света. Получают опыт измерения квадратурных распределений методом гомодинного детектирования

#### *Задача 8. Частотно-угловой спектр Спонтанного параметрического рассеяния света*

В этой задаче студенты знакомятся с явлением Спонтанного параметрического рассеяния света (СПР). Получают навык измерения частотно-углового спектра СПР и расчета его перестроечных кривых.

#### *Задача 9. Пространственный модулятор света*

В этой задаче студенты знакомятся с устройством жидкокристаллического пространственного модулятора света. Получают навык его калибровки. Исследуют свойства световых пучков различной формы.

### **Учебно-методическая литература и монографии**

В период с 2017 по 2021 год сотрудниками кафедры выпущена методическая литература, учебные пособия и монографии:

1. Мишина Е.Д., Шерстюк Н.Э., Евдокимов А.А., Вальднер В.О., Григорьев С.А., Долгова Т.В., Дроздова Н.М., Ежов А.А., Ершова Н.И., Лускинович П.Н., Панов В.И., Свитов В.И., Семин С.В., Стогний А.И., Федянин А.А., Щербаков М.Р. Методы получения и исследования наноматериалов и наноструктур. Лабораторный практикум по нанотехнологиям: учебное пособие. Под ред. Сигова А.С. Лаборатория знаний, Москва, ISBN 978-5-00101-473-7, 187 с., 2017.

2. Садовничий В.А., Федянин А.А., Грунин А.А., Карасев О.И., Кривцова А.О., Михайленко Д.А., Гершович А.Я., Перезолова А.С. Индекс развития транспортного комплекса мегаполисов. Аналитический доклад. М, 64 с., 2017.

3. Долгова Т.В., Ежов А.А., Китаева Г.Х., Кузнецов К.А., Кулик С.П., Любин Е.В., Музыченко Д.А., Орешкин А.И., Пенин А.Н., Федянин А.А., Панов В.И. Специальный практикум по квантовой электронике. Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова Москва, ISBN 978-5-8279-0151-8, 160 с., 2018.

4. Федянин А.А., Грунин А.А., Карасев О.И., Кривцова А.О., Михайленко Д.А., Николаева Е.А. 2018 Индекс развития транспортного комплекса крупнейших городов России. Аналитический доклад. М, 70 с., 2018.

5. Мусорин А.И. Статическая и фемтосекундная магнитооптика магнитоплазмонных решеток, магнитофотонных кристаллов и метаповерхностей. Издательство Московского университета Москва, ISBN 978-5-19-011338-9, 212 с., 2018.

6. Арсеев П.И., Маслова Н.С., Манцевич В.Н. Методы описания спектральной плотности шума туннельного тока при наличии межчастичного взаимодействия. Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова Москва, Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, 80 с., 2018.

7. Сысоев Н.Н., Садовников Б.И., Кулик С.П., Федянин А.А., Снигирев О.В., Королев А.Ф., Захаров П.Н., Елизаров С.Г., Знаменская И.А., Перепелкин Е.Е., Бобров И.Б., Борщевская Н.А., Дьяконов И.В., Страупе С.С., Кондратьев И.В., Ковлаков Е.В., Стручалин Г.И., Барсукова М.Г., Бессонов В.О., Долгова Т.В., Зубюк В.В., Кройчук М.К., Любин Е.В., Мусорин А.И., Панов В.И., Сафронов К.Р., Шорохов А.С., Щелкунов Н.М., Крупенин В.А., Преснов Д.Е., Трифионов А.С., Манцевич В.Н., Маслова Н.С., Шорохов В.В., Дагесян С.А., Сапков И.В., Колотинский Н.В., Белотелов В.И., Князев Г.А., Цысарь С.А., Саввин В.Л., Пирогов Ю.А., Сухарева Н.А., Потапов А.А., Белов А.А., Демин Д.С., Лукьянченко Г.А., Марков Д.С., Роганов В.А., Монахов А.М., Мурсенкова И.В., Коротеева Е.Ю., Дорощенко И.А. Фундаментальные и прикладные исследования в области цифровых квантовых технологий, фотоники и микроэлектроники. Труды научной школы. Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова (Москва), ISBN 978-5-8279-0176-1, 360 с., 2019.

8. Садовнический В.А., Белоусов Л.С., Мазей Ю.А., Федянин А.А., Солопова О.В., Козопольская А.В., Роева-Мкртчян Е.Б. Дни Дружбы МГУ и БГУ: Российско-белорусское междуниверситетское сотрудничество МГУ и БГУ на современном этапе. Материалы и документы: научно-практический сборник. Издательство Московского университета Москва, ISBN 978-5-19-011445-4, 165 с., 2019.

9. Колмычек И.А., Мурзина Т.В. Оптика метаповерхностей. Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова (Москва), 30 с., 2020.

### **Поощрения (премии, гранты, и пр.) за учебную и научную работу.**

В таблице представлены различные поощрения, полученные преподавателями, научными сотрудниками, аспирантами и студентами за учебную и научную работу в отчетный период.

#### **ПРЕПОДАВАТЕЛИ**

<b>НАМЕНОВАНИЕ</b>	<b>Ф.И.О.</b>	<b>ГОД ПРИСУЖДЕНИЯ</b>
Грант Президента РФ для государственной поддержки ведущих научных школ	А.А.Федянин	2018-2020 2020-2022
Конкурс работ, способствующих решению задач Программы развития Московского университета	Мурзина Т.В., Китаева Г.Х., Кулик С.П., Фадеев В.В.	2017-2021
Победитель конкурса фонда «Базис» в номинации «Спецкурс»	Мурзина Т.В.	2019

#### **НАУЧНЫЕ СОТРУДНИКИ**

<b>НАИМЕНОВАНИЕ</b>	<b>КОЛИЧЕСТВО</b>
Грант Президента РФ для поддержки молодых российских ученых	6
Конкурс работ, способствующих решению задач Программы развития Московского университета	27
Диплом министерства науки и ВО РФ за участие в фестивале науки и технологий «РобоАрмия» в рамках международного военно-технического форума «Армия –	1

2021»	
Премия Правительства Москвы молодым ученым	1
Стипендия МГУ талантливым молодым сотрудникам и преподавателям	3
Стипендия ректора МГУ	2
Конкурс работ, способствующих решению задач Программы развития Московского университета	2
Конкурс молодежных инновационных проектов "УМНИК"	2
Стипендия фонда «Базис» в номинации «Семинарист»	1
Победитель конкурса фонда «Базис» в номинации «Спецкурс»	1

### АСПИРАНТЫ

НАИМЕНОВАНИЕ	КОЛИЧЕСТВО
Стипендия Президента РФ для аспирантов	3
Стипендия Правительства РФ для аспирантов	4
Стипендия МГУ талантливым молодым сотрудникам и преподавателям	2
Конкурс работ, способствующих решению задач Программы развития Московского университета	4
Стипендия фонда «Базис» для аспирантов	11
Стипендия фонда развития науки и образования «Интеллект»	3
Конкурс молодежных инновационных проектов "УМНИК"	8
Грант на зарубежную стажировку некоммерческого фонда "Лифт в будущее"	1
Диплом за лучший доклад на конференции МЕТАНАНО 2019	1
Стипендия сообщества SPIE	1

### СТУДЕНТЫ

НАИМЕНОВАНИЕ	КОЛИЧЕСТВО
Именные стипендии: Имени М.В.Ломоносова	1
Стипендия МГУ для молодых преподавателей, научных сотрудников, аспирантов и студентов	1
Премии на конкурсе дипломных работ им. Р.В.Хохлова	4
Премия на конкурсе дипломных работ МЛЦ им. Н.И.Коротеева	2
Стипендия фонда «Базис» для магистрантов и студентов	10(6)
Стипендия фонда В.Потанина для студентов	1
Гранты для студентов по программе «УМНИК»	6+
Диплом первой степени за доклад на международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов»	4

### **ПОДДЕРЖКА И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ БАЗЫ**

Существенной организационной частью учебно-научной деятельности кафедры является совершенствование экспериментальной базы, необходимой для выполнения

специализированной учебной работы и научных исследований. За последние пять лет кафедры пополнилась оборудованием, необходимым для проведения исследований, обеспечивающих современный уровень подготовки студентов, аспирантов и научной работы, часть из которых приведена ниже:

1. Фемтосекундный лазер (источник импульсного лазерного излучения для накачки источников фотонов и квантовых точек).
2. Перестраиваемые лазерные системы с возможностью стабилизации и привязки частоты.
3. Сверхпроводящие детекторы (система регистрации оптических фотонов на основе сверхпроводниковых детекторов).
4. Источник фотонов (Источник одиночных фотонов на основе полупроводниковых квантовых точек в микрорезонаторах).
5. Оптический криостат (оптический криостат замкнутого цикла встроенный в оптический стол).
6. Учебно-научный комплекс по исследованию квантовых состояний света
7. Система AUREA Technology.
8. Стенд спектральной характеристики линейно-оптических интегральных схем в многофотонном и однофотонном режиме.
9. Программно- аппаратный комплекс Vip net.
10. Лазеры Tortica.
11. Полупроводниковый лазер непрерывной генерации Coherent Verdi G-5.
12. Электронный микроскоп Phenom ProX с программным обеспечением и набором дополнительных опций.
13. Спектроскопический комплекс в составе источника суперконтинуума с акустооптическим перестраиваемым модулем фильтрации Yslphotonics и пространственного фазового модулятора света Holoeye.
14. Оптический микроскоп Olympus CX23.
15. 3D принтер Sinterit Lisa Pro и 3D Принтер ProX320.
16. Оптический криостат замкнутого цикла attoDRY800 и комплекс для обеспечения его работы.
17. Временицифровой преобразователь TimeTagger 20.
18. Установка плазмохимической очистки CUTE-2MPR.
19. Видеокамера PRIME BSI.
20. Селектор лазерных импульсов OG-B-D-100k-800nm.
21. Фемтосекундный титан-сапфировый осциллятор Coherent Chaameleon Vision II.
22. Анализатор удельной поверхности дисперсных и пористых материалов.
23. Лазер FemtoFiber Ultra.
24. Микроскоп лабораторный проходящего света с цифровой камерой, c-mount адаптером, объективами План Ахромат 5x, 100x и программным обеспечением.
25. Сверхпроводящий болометр Scontel.
26. Пикосекундный Nd:YAG лазер EKSPLA с диодной накачкой и килогерцовой частотой повторения импульсов PL2211-A.
27. Лазерная система ультракоротких импульсов Femtonica PDPL-1202.
28. Терагерцовые фильтры Tydex, полосовые фильтры Optigrate, генератор ламинарного потока Standa.
29. Лазерная система на основе Nd:YAG лазера модели LQ629-100 и параметрического генератора света модели LP603.
30. Спектрофотометр Спектрофотометр Shimadzu UV-1800.
31. Спектрофлуориметр Shimadzu RF6000.
32. Диодные лазеры: SSP-DNL (с длинами волн 405 нм, 808 нм, 980 нм), “Лазервариоракурс” (с длиной волны 532 нм).
33. Центрифуга Eppendorf MiniSpin.
34. Измеритель мощности и энергии лазерного излучения (“Ophir”).
35. Фотоэлектронный умножитель, работающий в режиме счета фотонов Hamamatsu H 8259-02.
36. Установка для измерения кинетики релаксации флуоресценции с субпикосекундным временным разрешением на основе метода ап-конверсии.

## НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ КАФЕДРЫ

### Основные научные направления

Экспериментальные исследования на кафедре проводятся в 7 научных лабораториях по следующим направлениям:

- Лаборатория квантовых оптических технологий – рук. д.ф.-м.н., проф. С.П. Кулик.
- Квантовые явления в оптическом и терагерцовом диапазонах – рук. д.ф.-м.н., проф. Г.Х. Китаева, сменившая в 2016 году на этом посту своего учителя, основателя лаборатории, проф. А.Н. Пенина.
- Лазерная биофотоника – рук. д.ф.-м.н., проф. В.В. Фадеев, к.ф.-м.н., с.н.с. Е.А. Ширшин.
- Лазерная спектроскопия растворов супрамолекулярных соединений и наноструктур – рук. к.ф.-м.н., в.н.с. Т.А. Доленко.
- Нанооптика метаматериалов и наноструктур – рук. д.ф.-м.н., проф. А.А. Федянин.
- Нелинейная оптика наноструктур и фотонных кристаллов – рук. д.ф.-м.н., доцент Т.В. Мурзина.
- Сканирующая зондовая микроскопия и физика наноструктур – рук. д.ф.-м.н., проф. В.И. Панов, д.ф.м.н., в.н.с. А.И. Орешкин.

Теоретические исследования проводятся по следующим основным направлениям:

- Теория и моделирование многочастичных квантовых систем. Конденсированные среды в сильных электромагнитных полях – проф. А.Н. Рубцов.
- Динамика элементарных квантовых переходов – доц. П.В. Елютин.
- Неравновесные эффекты и нестационарный электронный транспорт в коррелированных наноструктурах – д.ф.-м.н., доц. Н.С. Маслова.
- Параметрическое рассеяние света в условиях пространственной или временной неоднородности – доц. П.А. Прудковский.

### Наиболее важные научные результаты

1. Создан экспериментальный комплекс по управлению массивами одиночных атомов рубидия для задач квантовых вычислений (100 атомов).
2. Создан экспериментальный комплекс на основе фотонных чипов для задач квантовых вычислений (25 пространственных мод).
3. Создана квантовая аппаратура для шифрования в магистральных линиях связи Quandor;
4. Создана аппаратура для защищенного обмена данных по оптоволоконным сетям QSS «Квантовый телефон».
5. На основе аппаратуры QSS развернута Университетская квантовая сеть, объединяющая 20 подразделений МГУ на кампусах «Воробьевы горы», «Моховая улица» и БЦ «Отрадное»;
6. Разработана и апробирована методология теневой квантовой томографии.
7. Разработана и апробирована методология модификации тепловых состояний света за счет отщепления заданного числа фотонов и применение таких состояний для демонстрации фундаментальных эффектов квантовой оптики.
8. Теоретически и экспериментально исследованы частотно-угловые и корреляционные свойства оптико-терагерцового бифотонного поля, возникающего при сильно невырожденном параметрическом рассеянии света. Впервые в мире зарегистрирована квантовая корреляция между фотонами оптических и терагерцовых частот.
9. Зарегистрировано холостое терагерцовое излучение при сильно-невырожденном параметрическом рассеянии света в режиме среднего и малого усиления.
10. Экспериментально измерены частотно-угловые спектры стоксовой и антистоксовой ветвей рассеяния на фонон-поляритонах терагерцовых частот в широком диапазоне температур от 300 до 7 К.
11. Разработаны методы терагерцовой спектроскопии, основанные на применении нелинейных интерферометров.

12. Впервые продемонстрирована фотопроводящая антенна на основе нанопленки топологического изолятора (ТИ)  $\text{Bi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_{3-y}\text{Se}_y$  (BSTS). Помимо известных нелинейных эффектов, в ТИ был реализован фотопроводящий механизм генерации терагерцового излучения за счет релаксации объемных электронов через поверхностные состояния.
13. Исследована генерация терагерцовой третьей и пятой гармоник в топологических изоляторах  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ ,  $\text{Bi}_2\text{Te}_2$  и  $\text{Bi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_{3-y}\text{Se}_y$ , достигнута высокая эффективность генерации без какого-либо вклада некогерентных процессов.
14. Методом терагерцовой спектроскопии временного разрешения исследована комплексная проводимость топологических изоляторов  $\text{Bi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_{3-y}\text{Se}_y$  различной толщины и химического состава. Впервые наблюдалось снижение проводимости в терагерцовом диапазоне по мере приближения химического состава к кривой Рена.
15. Разработана технология оптической навигации по операционному полю для определения границы опухоли, проведены испытания методики в МНОЦ МГУ на пациентах с раком мочевого пузыря.
16. Обнаружен эффект сверхбыстрого переноса энергии в системах гетерогенных хромофоров, ответственных за формирование флуоресценции биотканей в ИК области спектра.
17. Разработаны оптические методы неинвазивного определения концентраций молекулярных компонент в биотканях, в частности, картирования распределения воды *in vivo*.
18. На основе метода многофотонной томографии предложен метод для *in vivo* визуализации иммунных клеток у пациентов с помощью анализа параметров затухания автофлуоресценции.
19. Разработаны и применены на реальных данных микроспектроскопии комбинационного рассеяния алгоритмы выделения спектров молекулярных компонент на основе методов машинного обучения.
20. Методами комбинационного рассеяния (КР) и когерентного антистоксового рассеяния света (КАРС) экспериментально исследованы механизмы взаимодействия поверхностных групп детонационных наноалмазов с биомолекулами в воде и в биологических тканях.
21. С помощью лазерной спектроскопии КР исследованы свойства наноалмазов, легированных бором (НАЛБ), впервые синтезированных с размерами 7 нм. Обнаружены свойства НАЛБ, обеспечивающие их широкое применение в качестве наноагентов для гипертермии и термоабляции раковых опухолей. Проведена успешная апробация НАЛБ на клетках рака молочной железы человека MCF-7.
22. На основе наночастиц  $\beta\text{-NaYF}_4: \text{Yb}^{3+}/\text{Tm}^{3+}$  разработан клеточный термометр, обеспечивающий наилучшую точность определения температуры биоткани по сравнению с мировыми аналогами. Нанотермометр успешно апробирован в биоткани.
23. На основе углеродных точек разработаны и впервые созданы наносенсоры, способные одновременно идентифицировать и определять концентрацию 3-4 ионов тяжелых металлов.
24. Экспериментально реализована сверхбыстрая перестройка метаповерхности, состоящей из субволновых частиц арсенида галлия с Ми-резонансами в ближнем ИК диапазоне. Показана модуляция коэффициента отражения на 35% за пикосекундные времена вблизи магнитодипольного резонанса метаповерхности и сдвиг резонанса на 30 нм при воздействии импульса начатки с энергией менее  $400 \text{ мкДж/см}^2$ .
25. Продемонстрирована возможность полностью оптического управления светом при помощи таммовских плазмон-поляритонов. Обнаружена возможность уменьшения времени переключения до 150 фс.
26. Показано, что полностью диэлектрические метаповерхности могут быть использованы для управления поляризацией и направлением распространения света.
27. Разработана методика создания полимерных волноводов для поверхностных электромагнитных волн в фотонных кристаллах методом двухфотонной литографии.
28. Экспериментально продемонстрирована резонансная сверхбыстрая полностью оптическая модуляция поперечного магнитооптического эффекта Керра в одномерном магнитоплазмонном кристалле никеля. Показано, что термализация и релаксация электронов в магнитоплазмонном кристалле в несколько раз медленнее, чем в плоском никеле.

29. Реализовано спектрально контролируемое усиление поперечного магнитооптического эффекта Керра в двумерных гибридных металл-диэлектрических магнитоплазмонных метаповерхностях.
30. Обнаружены резонансные особенности спектров нелинейно-оптического отклика единичных органических микрокристаллов в форме микро-пирамид, параллелепипедов, микрошаров, отражающие возбуждение в них мод шепчущей галереи, Фабри – Перо, а также т.н. bow-tipe. Вид мод определен на основе аналитических и численных расчетов методом конечных разностей во временной области.
31. Методом нелинейно-оптической микроскопии изучены эффекты нелинейного волноводного распространения света в микростержнях на основе киральных материалов, обнаружено усиление эффекта кругового дихроизма частоте двухфотонной люминесценции, связанное с волноводными свойствами структур.
32. Обнаружены эффекты генерации синхронной оптической второй гармоники в одномерных фотонных кристаллах на основе пористого кремния в схеме Лауэ.
33. Представлены результаты исследования начальной стадии адсорбции Ge на поверхности Au(111) с анализом особенностей роста и стабильности формируемых на поверхности структур методами сверхвысоковакуумной низкотемпературной сканирующей туннельной микроскопии и теории функционала плотности. Установлено, что адсорбция единичных атомов Ge на поверхности Au(111) при комнатной температуре приводит к замещению атомов Au атомами Ge в первом поверхностном слое.
34. Методом сверхвысоковакуумной сканирующей туннельной микроскопии исследованы динамика адсорбции и эволюция молекул фторфуллеренов C<sub>60</sub>F<sub>18</sub> на поверхности Cu(001) в реальном времени. Показано, что молекулы фторфуллеренов на поверхности Cu(001) с течением времени разлагаются и трансформируются в молекулы C<sub>60</sub>.
35. Методами сканирующей туннельной микроскопии (СТМ) и туннельной спектроскопии в условиях сверхвысокого вакуума исследованы начальные стадии адсорбции молекул фторированных фуллеренов C<sub>60</sub>F<sub>18</sub> на поверхностях Si(111)-7×7, Si(001)-2×1 и Cu(001)-1×1. Установлено, что молекулы фторфуллеренов позволяют локально модифицировать поверхность Si в нанометровом масштабе путем ее локального травления.
36. Методом сканирующей туннельной микроскопии (СТМ) и с помощью моделирования на основе теории функционала плотности (DFT) изучено образование однодоменной (3×3) и многодоменной ( $\sqrt{7}\times\sqrt{7}$ ) R( $\pm 19.1^\circ$ ) фаз германена на поверхности Al(111) в субмонослойной области. Экспериментальные результаты показали, что обе германеновые фазы зарождаются и растут независимо друг от друга и независимо от температуры Al-подложки в значительно расширенном диапазоне T<sub>s</sub> = 27–200° С.
37. Методом сверхвысоковакуумной сканирующей туннельной микроскопии (СТМ) была исследована возможность осуществления синтеза однослойного германена на металлических поверхностях: Au(111), Pt(111), Cu(111) и Al(111). Было четко показано, что даже при комнатной температуре взаимодействие атомов Ge с металлами Au, Pt и Cu приводит к твердофазной растворимости Ge в этих металлах. что, в свою очередь, исключает возможность роста однослойного германена на этих металлах.
38. Разработанная техника учета флуктуаций коллективных мод в коррелированных системах позволила воспроизвести фазовую диаграмму ВТСП-купратов, описываемых моделью Хаббарда.
39. Предложена экспериментальная схема для идентификации в квантовых точках двухэлектронных состояний с помощью анализа нестационарных токов и остаточного заряда для различных резервуаров.
40. Показано, что стационарное состояние электронов в связанных квантовых точках со взаимодействием и характерные времена релаксации зависят от – начальных условий, состояния резервуара и способа его подключения. В результате зависимости положения ионов от электронного заполнения возникают перепутанные состояния между электронной и вибрационной подсистемами, и могут формироваться особые состояния вибрационной моды вида «Schrödinger cat»



## Научные публикации и участие в международных конференциях

За последние пять лет сотрудниками кафедры было опубликовано всего статей в журналах, сборниках и т.д. 985, из них вошедшие в топ 25 составили **263**, (в предыдущие 5 лет таких публикаций было **247**). В основном работы публиковались в ведущих отечественных и зарубежных физических журналах (Physical Review Letters, Physical Review, Nanoscale, Optics Express, Journal of Physical Chemistry C, Applied Optics, Journal of Biophotonics, Applied Physics Letters, Phys. Rev A., Euro.Phys.Lett., JOSA, Optics Letters, ACS Photonics, Optics Communications, Journal of Raman Spectroscopy, Surface Science и Письма в ЖЭТФ, ЖЭТФ, Квантовая электроника, Доклады АН, Фотоника др.). За отчетный период сделано около **210** докладов на научных конференциях, в том числе пленарных и приглашенных (в предыдущие 5 лет их было **330**). Уменьшение количество докладов за последнее время было вызвано резким уменьшением числа конференций в период пандемии.

## Участие в научных грантах и проектах

Важнейшей формой организационно-финансового обеспечения научных и научно-технологических исследований на кафедре является участие в российских и международных грантах и проектах. Общее количество грантов и проектов, полученное в последние пять лет, составляет **182** (в предыдущий период – 96). Всего в **настоящее время** (2021 г.) под руководством сотрудников кафедры выполняется **48** грантов, проектов, контрактов и договоров. В период 2017 – 2021 гг. сотрудники кафедры являлись руководителями **4** НИР (в 2011-2016 – 3) ; **18** грантов РФФ (в 2011-2016 гг. – 4 грантов), **8** проектов в рамках Государственного Оборонного Заказа, **91** гранта РФФИ (в 2011-2016 гг. – 67 грантов), **5** грантов Министерства образования и науки (в 2011-2016 гг. – 1 гранта), в том числе, **1** Мегагранта; **1** проекта Фонда Перспективных Исследований; **1** проекта НТИ; **1** проекта в рамках 218 постановления правительства РФ; **1** Программы Цифровая экономика «Информационная безопасность»; **8** грантов Президента РФ для молодых докторов и кандидатов наук (в 2011-2016 гг. – 7 грантов). На кафедре выполняются работы по Договорам с ООО «Суал-ПМ», с ООО «Валком», с ООО "Исследовательский центр "Самсунг". Кроме того, молодыми сотрудниками было получено **58** индивидуальных единовременных грантов поддержки в рамках международных проектов, грантов РФФИ и др. (в 2011-2016 гг. – их было около 20). Информация об **основных** выполненных и текущих грантах и проектах приведена в таблице.

### ГРАНТЫ И ПРОЕКТЫ

Период	Всего получено грантов	РНФ	РФФИ (иниц., междунар., пригл. м. учен., ОФИ)	ГОЗ, ФПИ, НТИ	Минобрнаука, Роснаука (Ростехрег.) и др.	Молодые ученые (Гранты Президента и др.)
2011-2015	96	4	67	7	5	7
Действ. в 2016 г.	46	4	28	7	2	3
2017-2020	182	18	91	10	7	58
Действ. в 2021 г.	48	11	17	10	7	6

Общий объем финансирования, привлеченного кафедрой и Центром Квантовых Технологий в рамках грантов и проектов в отчетный период, составил 2 426 млн.руб (т.е. около 2.5 млрд руб).

## Научное сотрудничество.

Кафедра традиционно осуществляет научные связи со многими подразделениями МГУ, отечественными и зарубежными научными центрами, и университетами. Научная работа на кафедре проводится в тесном сотрудничестве с кафедрами и подразделениями

физического факультета МГУ (общей физики и волновых процессов; физики полимеров и кристаллов; магнетизма; колебаний; оптики, спектроскопии и физики наносистем и др.), НИИЯФ МГУ (лаборатория искусственного интеллекта), центром гидрофизических исследований, другими факультетами МГУ (кафедры органической химии, аналитической химии, радиохимии химического факультета; кафедра биофизики биологического факультета; кафедра физиологии и общей патологии факультета фундаментальной медицины и др.), МНОЦ МГУ, ведущими исследовательскими центрами Москвы (Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН; Институт общей физики им. А.Н. Прохорова РАН; Институт спектроскопии РАН; Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники РАН; Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН; Институт нефтехимического синтеза им. А.В.Топчиева РАН; Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН; Московский технологический университет (ранее – МИРЭА); Сколтех; ВШЭ); ФНИЦ "Кристаллография и фотоника" РАН (ранее – Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова РАН); Институт общей и неорганической химии имени Н. С. Курнакова РАН; и др.), Санкт-Петербурга (Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе; Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики), Новосибирска (Институт физики полупроводников СО РАН), Нижнего Новгорода (Институт физики микроструктур, Институт прикладной физики РАН); Саратова (Саратовский государственный технический университет им.Ю.А.Гагарина), Башкирским государственным университетом (г. Уфа), Институтом химии растворов им. Г.А. Крестова (г. Иваново), и др.

Партнерами кафедры по международному научному сотрудничеству являются исследовательские центры: *Австралии* (Австралийский национальный университет, Канберра); *Белоруссии* (Университет г. Гродно; Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению, г. Минск); *Бельгии* (Католический университет г. Левена); *Бразилии* (Федеральный Университет Санты Катарины, г.Санта-Катарина); *Германии* (г. Берлин – Свободный Университет г. Берлина, Берлинский университет имени Гумбольдта, Технический университет Берлина, Клиника Шарите; г. Гамбург – Гамбургский университет; г. Йена – Институт прикладной физики, Университет им. Фридриха Шиллера; г. Саарбрюккен – Университет Саарлэнда; г. Эрланген – Институт Макса Планка; г.Дрезден - Центр им. Гельмгольца Дрезден-Россендорф; Компания ArtPhotonics); *Израиль* (Университет Тель Авива, г. Тель-Авив); *Италии* (Институт Метрологии, г. Турин); *Китая* (Институт Физики китайской академии наук, г. Пекин; Школа физики Университета Нанкина, г. Нанкин; Чжэцзянский технологический университет, г.Чжаньжоу; Цинхуа университет, г. Пекин); *Нидерландов* (Университет г. Наймеген; Медицинский университет Эразмус); *Польши* (Университет г. Гданьск; Университет г. Белосток); *Сингапур* (Национальный университет Сингапура); *США* (Ратгерский университет, Нью-Джерси; Гарвардский университет, Массачусетс; *Тайваня* (Национальный Университет Тсинг-Хуа, Синьчжу; Национальный Центральный Университет, Таоюань; Национальный университет Тайваня, Тайбэй); *Финляндии* (университет г. Турку); *Франции* (Университет Бургундии, Дижон); *ЮАР* (Университет Витватерсранд, г. Йоганесбург); *Японии* (Университет Тохоку, Сендай; Технологический университет Тойохаши, Тойохаши), и других стран.

### **Научно-организационная работа.**

Сотрудники кафедры входят в состав различных научно-организационных структур, в том числе:

а) ученых советов:

- Ученого Совета МГУ,
- Ученого Совета физического факультета МГУ,

б) диссертационных советов:

- 3-х Диссертационных советов в МГУ;
- Московский технологический университет (ранее – МИРЭА);

в) членов программных и организационных комитетов Российских и международных конференций – на 21 конференции, в том числе, на 2 в качестве председателя комитета;

г) редакционных коллегий научных журналов:

- "Успехи физических наук" (акад. Л.В. Келдыш); д.ф.-м.н. М.В. Чехова),
- "Solid State Communications" (акад. Л.В. Келдыш).
- "Laser Physics Review" (проф. С.П. Кулик)
- "Applied Mathematics & Information Sciences" (проф. С.П. Кулик)
- "Письма в ЖЭТФ" (проф. С.П. Кулик)
- "Laser Physics Letters" (проф. С.П. Кулик)
- "Laser Physics" (проф. С.П. Кулик)
- "International Journal of Quantum Information" (проф. С.П. Кулик)
- "Вестник Московского университета" (проф. А.А. Федянин)
- «Известия ВУЗ. Радиофизика» (проф. Г.Х. Китаева)

д) экспертного совета ВАК:

- Председатель (проф. А.А. Федянин)

Молодые сотрудники кафедры принимают участие в организации и проведении Международных и Российских школ молодых ученых по современным проблемам квантовой электроники, квантовых технологий, физики конденсированных сред и нанофотоники (в шести за отчетный период).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Коллектив кафедры квантовой электроники в отчетный период продолжил наращивать свои усилия по всем направлениям научно-педагогической работы. За пять лет на кафедре подготовлено три новых магистерских программы: квантовые вычисления, прикладная квантовая связь и биомедицинская фотоника, по которым с учетом традиционной программы – квантовая электроника и квантовая оптика - обучается **94** студента и **30** аспирантов.

Появление новых магистерских программ привело к введению в учебный план кафедры более 30 новых учебных курсов (включая курсы для аспирантов), часть из которых в 2021 г. находятся в режиме тестирования и поэтому не представлены в отчете за прошедший период. Продолжается чтение общих курсов лекций для бакалавров «Введение в квантовую физику» (3 семестр) и «Квантовая теория» (6 и 7 семестры), подготовлено 14 новых задач специального физического практикума.

Деятельность кафедры отмечена различными поощрениями, которыми удостоены сотрудники, аспиранты и студенты кафедры – персональные стипендии, гранты и премии.

В отчетный период было получено **182** гранта, проекта и контракта (в предыдущий период их было **96**). Из них действующих в настоящий момент – **48**, в том числе **4** НИР, **11** грантов РФФИ, **10** проектов в рамках Государственного Оборонного Заказа, Фонда Перспективных Исследований и НТИ, **4** гранта Министерства образования и науки и Ростехрегулирования, **17** грантов РФФИ, договора с ООО «Суал-ПМ», ООО «Валком» и ООО «Исследовательский центр «Самсунг», **6** грантов для молодых ученых. В 2017 г. был получен мегагрант по теме: «Нелинейная и экстремальная нанофотоника». Объём привлеченного финансирования в отчетном периоде по этим проектам составил 2 426 млн. руб.

Всего за предыдущий период было опубликовано 985 работ, из них вошедшие в топ 25 составили **263**, и сделано 210 докладов на конференциях, причем около половины всех работ выполнено в соавторстве со студентами и аспирантами.

Защищено **15** кандидатских диссертаций и **1** докторская. Выпущено **4** учебных пособия, **5** монографий и глав в коллективных монографиях. Значительно пополнилась материально-техническая база экспериментальных работ. Развиваются новые направления в различных областях квантовой электроники и физике конденсированных сред, нанофотоники и квантовых технологий.

Выполнены ключевые работы в рамках проектов НИР и ОКР, в которых получены приоритетные практические результаты. Создана аппаратура для шифрования в магистральных линиях квантовой связи Quador и для защищенного обмена данных по оптоволоконным сетям QSS «Квантовый телефон».

На основе аппаратуры QSS развернута Университетская квантовая сеть, объединяющая 20 подразделений МГУ на кампусах «Воробьевы горы», «Моховая улица» и БЦ «Отрадное».

Параметры используемой системы связи не уступают, а по защищенности превышают параметры зарубежных аналогов. Ведутся успешные работы по направлению квантовых вычислений: создан экспериментальный комплекс по управлению массивами одиночных атомов рубидия для задач квантовых вычислений (100 атомов) и комплекс на основе фотонных чипов для таких же задач с 25 пространственными модами.

В настоящее время теоретические и экспериментальные исследования, представленные на кафедре, отвечают передовым тенденциям развития науки и научных технологий, что позволяет осуществлять углубленную подготовку студентов по всем имеющимся на кафедре научным направлениям.

Таким образом, за отчетный период кафедрой получен целый ряд результатов, отражающих интенсивное развитие новых научных направлений в самых современных областях квантовой электроники, нанофотоники, квантовой оптики и обработки информации. Успехи в научной и педагогической деятельности привели к существенному увеличению числа студентов и аспирантов, ежегодно приходящих на кафедру. В дальнейшем планируется направить усилия сотрудников на совершенствование учебной работы, развитие новых научных направлений и сохранение кафедральных традиций.

Заведующий кафедрой квантовой электроники,  
профессор

В. И. Панов