

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова
Филиал Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова
в городе Сарове

УТВЕРЖДАЮ



Директор филиала МГУ в г. Сарове
член-корреспондент РАН В.В.Воеводин

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

Наименование дисциплины:

ВВЕДЕНИЕ В КВАНТОВУЮ НЕЛИНЕЙНУЮ ОПТИКУ

Уровень высшего образования:

Магистратура

Направление подготовки:

03.04.02 Физика

Направленность (профиль) ОПОП:

Лазерная нелинейная оптика и фотоника

Квалификация «Магистр»

Форма обучения: Очная

Саров 2021 г.

Рабочая программа дисциплины разработана в соответствии с самостоятельно установленным МГУ образовательным стандартом (ОС МГУ) для реализуемых основных профессиональных образовательных программ высшего образования по направлению подготовки 03.04.02 Физика в редакции приказа по МГУ от 30 декабря 2020 г. №1366.

Авторы–составители:

К.ф.-м.н., доцент Магницкий Сергей Александрович, кафедра общей физики и волновых процессов физического факультета МГУ

Аннотация к рабочей программе дисциплины «Введение в квантовую нелинейную оптику»

В курсе изучаются физические процессы, лежащие в основе квантовой нелинейной оптики. Дисциплина по выбору читается на 1м году обучения во 2 ом семестре

Сформулированы достижения в оптике, отмеченные нобелевскими премиями. Приведена краткая выжимка базовых понятий классической нелинейной оптики, в частности показывается как с помощью двухкаскадного пикосекундного генератора света может быть измерена плотность состояний электромагнитного вакуума.

На языке дираковской формулировки квантовой механики вводятся основные понятия, используемые для математического описания одиночных фотонов: гильбертово пространство, квантовое состояние, операторы квантованного светового поля, запутанные квантовые состояния Бэлла. На основе квантового расчета светоделителя и интерферометра Маха-Цендера в Шредингеровском и Гейзенберговском представлениях слушатели приобретают практические навыки в анализе квантовых оптических устройств.

Излагается квантовая теория спонтанного параметрического рассеяния (СПР). Детально описывается двухкристальная неколлинеарная схема СПР 1-го типа.

Описываются основные приборы и экспериментальные методы квантовой оптики: счетчики одиночных фотонов, время-цифровой преобразователь, метод совпадений, квантовая томография.

Изложены теоретические основы фантомной квантовой оптики. Описан экспериментальный способ формирования фантомных поляризационных изображений в бифотонном свете.

Изложены способы получения существенного нелинейно-оптического отклика на уровне одиночных фотонов. Рассмотрены такие эффекты как ридберговская блокада и электромагнитно-индуцированная прозрачность с использованием ридберговских атомов.

Слушателей знакомят с основными понятиями квантовой информатики, с интерфейсом платформы IBM Quantum Experience и основами программирования на квантовом языке QisKit

Разделы рабочей программы

1. Место дисциплины в структуре основной профессиональной образовательной программы высшего образования (ОПОП ВО).
2. Входные требования для освоения дисциплины (модуля), предварительные условия (при наличии)
3. Результаты обучения по дисциплине (модулю), соотнесенные с формируемыми компетенциями
4. Форма обучения.
5. Язык обучения.
6. Содержание дисциплины.
7. Объем дисциплины
8. Структурированное по темам (разделам) содержание дисциплины (модуля) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий
9. Текущий контроль и промежуточная аттестация.
10. Фонд оценочных средств (ФОС) для оценивания результатов обучения по дисциплине (модулю).
11. Шкала оценивания.

12. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения текущего контроля успеваемости.
13. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения промежуточной аттестации.
14. Материально-техническая база, информационные технологии, программное обеспечение и информационные справочные системы

1. Место дисциплины в структуре ОПОП ВО

В результате освоения дисциплины «Введение в квантовую нелинейную оптику» обучающийся кроме знаний предмета получает навыки применения ранее полученных знаний для решения новых научных и практических задач.
Дисциплина читается во 2 семестре и относится к вариативной части.

2. Входные требования для освоения дисциплины (модуля), предварительные условия

Освоение дисциплин «Электромагнетизм», «Электродинамика», «Оптика», «Математический анализ», «Квантовая механика», «Дифференциальные уравнения», «Теория колебаний», «Теория волн».

3. Результаты обучения по дисциплине (модулю), соотнесенные с формируемыми компетенциями

В результате освоения дисциплины у обучающихся должны быть сформированы:

Формируемые компетенции (код компетенции)	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю)
Способность использовать знания современных проблем и новейших достижений в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники в своей научно-исследовательской деятельности (СПК-1)	<p>Знать основные законы и направления современных научных исследований в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники.</p> <p>Уметь на основе фундаментальных знаний в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники, определять возможные направления научных исследований.</p> <p>Владеть необходимой информацией из современных отечественных и зарубежных источников по тематике избранного направления исследования в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники.</p>
Способность организовать и планировать физические исследования, ставить конкретные задачи научных	<p>Знать базовые принципы организации научных исследований с использованием информационных технологий, основные методики работы на современном научном оборудовании в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники.</p>

<p>исследований в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники и решать их с помощью современной аппаратуры, оборудования и информационных технологий (СПК-2)</p>	<p>Уметь используя знания в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники проводить научные исследования.</p> <p>Владеть навыками планирования научного исследования, анализа получаемых результатов, обобщения, оформления и публичного представления полученных результатов.</p>
<p>Способность определять основные направления внедрения научных результатов в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники (СПК-3).</p>	<p>Знать основные направления инновационного развития в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники.</p> <p>Уметь проводить необходимый анализ современных тенденций научных инноваций в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники для подготовки предложений по внедрению полученных научных результатов.</p> <p>Владеть методами обоснования возможного применения полученных научных результатов с учетом современных достижений в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники.</p>

4. **Форма обучения:** очная

5. **Язык обучения:** русский

6. **Содержание дисциплины:**

Введение. Тенденции развития современной оптики. Основные достижения в оптике, отмеченные Нобелевскими премиями.

Тема 1. Базовые положения классической нелинейной оптики. Метод медленно меняющихся амплитуд. Нелинейный оператор для медленно меняющейся амплитуды в диспергирующей среде с учетом дифракции. Фазовый и групповой синхронизмы. Реализация фазового и группового синхронизмов в одноосных и двуосных нелинейных кристаллах. Нелинейные процессы на нелинейности 2-го порядка $\chi^{(2)}$: генерация 2-й гармоники, суммарной и разностной частоты, ап-конверсия.

Тема 2. Многофотонная параметрическая генерация света. Неколлинеарный синхронизм. Двухкристальный параметрический генератор света с пикосекундной накачкой и инжекцией излучения. Измерение плотности энергии нулевых колебаний электромагнитного вакуума

Тема 3. Основы квантовой оптики. Дираковская формулировка квантовой механики. Квантование гармонического осциллятора. Квантование светового поля. Канонические переменные поля. Операторы рождения и уничтожения. Гильбертово пространство. Фоковские состояния. Оператор числа частиц и корреляционная функция $g(2)$. Когерентное состояние. Некоторые соотношения операторной алгебры. Парадокс ЭПР в формулировке Боба: поляризационно запутанные состояния. Состояния Бэлла. Квантовая теория оптического делителя и интерферометра Маха-Цендера.

Тема 4. Спонтанное параметрическое рассеяние света. Вырожденное спонтанное параметрическое рассеяние; квадратурно-сжатый свет, бифотоны. Статистика бифотонов. Коррелированные и запутанные фотонные состояния, получаемые в результате СПР. Экспериментальная схема двухкристального неколлинеарного СПР генератора 1-го типа на кристалле ВВО.

Тема 5. Экспериментальные методы квантовой оптики. Метод счета фотонов. Статистика фотоотчетов малофотонных источников. Обратная задача статистики фотоотчетов. Счетчик одиночных фотонов. Многопиксельный кремниевый фотоумножитель SiФЭУ. Время-цифровой преобразователь. Схема совпадений. Измерение длительности бифотонов на основе эффекта двухфотонной интерференции. Квантовый томограф для характеристики поляризационно-запутанных состояний фотонов. Квантовое гомодинирование

Тема 6. Фантомная квантовая оптика. Формирование фантомных изображений в режиме одиночных фотонов. Теория фантомной поляриметрии в классическом и квантовом свете. Экспериментальная схема получения фантомных изображений объектов, обладающих линейным дихроизмом в квантовом бифотонном свете, генерируемым СПР-источником.

Тема 7. Однофотонная нелинейная оптика. Оптическая нелинейность на уровне одиночных фотонов. Способы получения существенного нелинейно-оптического отклика на уровне одиночных фотонов. Ридберговские атомы. Ридберговская блокада. Электромагнитно-индуцированная прозрачность с использованием ридберговских атомов. Однофотонный переключатель прозрачности с использованием ридберговских атомов.

Тема 8. Квантовое программирование. Основные понятия квантовой информатики. Однокубитные и двухкубитные вентили. Знакомство с интерфейсом платформы IBM Quantum Experience. Основы программирования на квантовом языке QisKit

7. Объем дисциплины

НАЗВАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ	Трудоемкость в зачетных единицах	объем учебной нагрузки в ак. часах				
		Общая трудоемкость	в том числе ауд. занятий			Самостоятельная работа студентов
			Общая аудиторная нагрузка	Лекций	Семинаров	
Введение в квантовую нелинейную оптику	2	72	34	17	17	38

8. Структурированное по темам (разделам) содержание дисциплины (модуля) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий

Изучение курса «Введение в квантовую нелинейную оптику» включает в себя лекции, на которых рассматривается теоретическое содержание курса, обсуждение вопросов, обозначенных в темах дисциплины; самостоятельную работу, заключающуюся в подготовке к лекционным занятиям, выполнения домашних заданий. По вопросам, вызывающим затруднения, проводятся консультации.

№ темы	Наименование раздела дисциплины	Виды учебной нагрузки и их трудоемкость, часы					Форма текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации
		Всего часов	Лекции	Научно-практические	Семинары	Самостоятельная работа	
1	Базовые положения классической нелинейной оптики	8	2		2	4	Собеседование, опрос
2	Многофотонная параметрическая генерация света	4	1	-	1	2	
3	Основы квантовой оптики	12	3	-	3	6	
4	Спонтанное параметрическое рассеяние света	10	3		3	4	
5	Экспериментальные методы квантовой оптики	6	2		2	4	
6	Фантомная квантовая оптика	10	2		2	4	
7	Однофотонная нелинейная оптика	8	2		2	4	
8	Квантовое программирование	10	2		2	6	
	Промежуточная аттестация					4	Экзамен в устной форме
ИТОГО:		72	17	-	17	38	

9. Текущий контроль и промежуточная аттестация.

Текущий контроль по дисциплине «Введение в квантовую нелинейную оптику» осуществляется на лекциях и заключается в оценке активности слушателей, качества ответов на вопросы лектора, аргументированности позиции студента, оценивается широта используемых им теоретических знаний. В семестре в конце некоторых лекций проводятся несколько коротких контрольных работ (10 – 15 минут).

Промежуточная аттестация по дисциплине «Введение в квантовую нелинейную оптику» проводится в форме экзамена. Результаты сдачи экзамена оцениваются по шкале «неудовлетворительно», «удовлетворительно», «хорошо», «отлично». Оценки «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» означают успешное прохождение промежуточной аттестации.

10. Фонд оценочных средств (ФОС) для оценивания результатов обучения по дисциплине (модулю).

Требования к структуре и содержанию фонда оценочных средств текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине

Перечень оценочных средств, применяемых на каждом этапе проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине, представлены в таблице

Наименование оценочного средства	Краткая характеристика оценочного средства	Представление оценочного средства в фонде
Оценочные средства текущего контроля		
Тематический опрос (в форме ответов на вопросы)	Средство контроля, организованное как короткий письменный ответ на поставленный вопрос по тематике предыдущей или текущей лекции, рассчитанное на выяснение объема и качества знаний, усвоенных обучающимися по определенному разделу, теме, проблеме.	Перечень тем, изучаемых в рамках дисциплины
Собеседование (в форме беседы, дискуссии по теме)	Средство контроля, организованное как свободная беседа, дискуссия по тематике изучаемой дисциплины, рассчитанное на выяснение объема знаний обучающегося по всем изученным разделам, темам; свободного использования терминологии для аргументированного выражения собственной позиции.	Перечень тем, изучаемых в рамках дисциплины
Оценочные средства промежуточной аттестации		
Короткая письменная работа	Средство, позволяющее оценить сформированность систематических представлений о методах научно-исследовательской деятельности.	Перечень вопросов к экзамену

11. Шкала оценивания.

Планируемые результаты обучения	Критерии оценивания результатов обучения			
	2	3	4	5
ЗНАТЬ: принципы работы квантовых оптических устройств ОПК-3.Б 3-6	Отсутствие знаний принципов работы квантовых оптических устройств	В целом успешные, но не систематические знания принципов работы квантовых оптических устройств	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы знания принципов работы квантовых оптических устройств	Успешные и систематические знания принципов работы квантовых оптических устройств
УМЕТЬ: работать с квантовыми оптическими устройствами и ОПК-3.Б У-6	Отсутствие умения работать с квантовыми оптическими устройствами	В целом успешное, но не систематическое умение работать с квантовыми оптическими устройствами	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы умение работать с квантовыми оптическими устройствами	Успешное и систематическое умение работать с квантовыми оптическими устройствами
ВЛАДЕТЬ: методами описания и расчета квантовых оптических устройств ОПК-3.Б В-6	Отсутствие/фрагментарное владение методами описания и расчета квантовых оптических устройств	В целом успешное, но не систематическое владение методами описания и расчета квантовых оптических устройств	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы владение методами описания и расчета квантовых оптических устройств	Успешное и систематическое владение методами описания и расчета квантовых оптических устройств

12. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения текущего контроля успеваемости.

Материалы текущего контроля успеваемости обучающихся:

Пример:

1. Что такое неколлинеарный синхронизм?
2. Дать определение фоковского состояния.
3. Что описывает формула Мандела?
4. Что такое квантовая телепортация?

5. Нарисовать схему СПР генератора 1-го типа

13. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения промежуточной аттестации.

Материалы промежуточного контроля успеваемости обучающихся в форме экзамена:

1. Изложить метод медленно-меняющихся амплитуд для описания нелинейно-оптических явлений в классическом свете. Понятие фазового и группового синхронизмов
2. Объяснить эффект параметрического усиления света в нелинейном кристалле
3. Как измерить плотность мощности нулевых колебаний электромагнитного вакуума с помощью параметрического усиления света
4. Дираковская формулировка квантовой механики. Квантование гармонического осциллятора.
5. Квантование светового поля. Операторы рождения и уничтожения. Гильбертово пространство. Фоковские состояния. Оператор числа частиц и корреляционная функция $g^{(2)}$. Когерентное состояние.
6. Парадокс ЭПР в формулировке Боба: поляризационно запутанные состояния. Состояния Бэлла. Квантовая теория оптического делителя и интерферометра Маха-Цендера
7. Дираковский формализм квантовой теории. Поляризационное состояние фотонной пары. Рассчитать условную вероятность прохождения фотона В через поляризатор, установленный под углом α к выбранному поляризационному базису, при условии, что фотон А был зарегистрирован после прохождения через поляризатор, установленный под 45° ?
8. Выполнить квантовый расчет однофотонной и двухфотонной интерференции. Чему равна корреляционная функция 2-го порядка для двухфотонной интерференции?
9. Базовые приборы квантовой оптики: Счетчики одиночных фотонов и время-цифровой преобразователь. Что такое heralded photon?
10. Эффект спонтанного параметрического рассеяния в нелинейном кристалле. Квантовый расчет генерируемого состояния бифотонов.
11. Генерация перепутанных по поляризации фотонов с помощью двухкристальной СПР схемы 1-го типа: конструкция источника. Что такое состояния Бэлла?
12. Квантовый томограф для измерения поляризационно-запутанных состояний Бэлла
13. Что такое гомодинирование? Описать оптическую схему, являющуюся эквивалентом для расчета результата измерения квантового состояния фотона неидеальным детектором
14. Полуклассическая и квантовая формулы распределения фотоотсчетов. Какие существуют статистики фотонов? Записать их распределение. Схема измерения статистики фотонов.
15. Обратная задача фотоотсчетов. Что такое факториальные моменты?
16. Квантовая телепортация: принцип телепортации кубита с помощью первого Бэлловского состояния $|\Phi^+\rangle$. Реализация с помощью двухкристальной схемы СПР генератора

17. Что такое квантовая фантомная оптика. Изложите теорию формирования амплитудных фантомных изображений в потоке бифотонов
18. Как получить поляризационные фантомные изображения объектов с линейным дихроизмом? Опишите теорию формирования таких изображений и схему экспериментальной установки для их получения
19. Способы получения нелинейно-оптического отклика среды на уровне одиночных фотонов. Ридберговские атомы как среда с однофотонной нелинейностью
20. Что такое эффект ридберговской блокады и электромагнитно-индуцированная прозрачность?
21. Основные понятия квантовой информатики. Однокубитные и двухкубитные вентили. Опишите основные функциональные возможности квантовой вычислительной платформы IBM Quantum Experience
22. Опишите структуру и принцип работы квантовой программы телепортации с состоянием $|\Phi^+\rangle$ на квантовом языке QisKit в квантовом Интерпретаторе платформы IBM Quantum Experience.

14. Материально-техническая база, информационные технологии, программное обеспечение и информационные справочные системы

Основная литература.

1. Лоудон Р. Квантовая теория света. М.: Мир, 1976
2. Ахманов, С. А., & Хохлов, Р. В. (1964). Проблемы нелинейной оптики. М.: ВИНТИ, 285
3. S.A.Magnitskiy et al. Generation of bandwidth-limited tunable picosecond pulses by injection locked optical parametric oscillators, *Opt. Lett.*, v.11, No.1, p.18-20, (1986)
4. Квантовое изображение. / Под ред. М.И. Колобова; Перевод с англ. Т.Ю. Голубевой под ред. А.С. Чиркина. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. - 328 с.
5. С.А. Магницкий and А.С. Чиркин. Статистика фотоотчетов классических и квантовых световых полей. Москва, Москва, 2019.
6. С.А. Чивилихин. Квантовая информатика. Учебное пособие, – СПб: СПбГУИТМО, 2009. – 80с.

Дополнительная литература.

1. Дмитриев, В.Г. and Тарасов, Л.В., 1982. Прикладная нелинейная оптика: Генераторы второй гармоники и параметрические генераторы света. М.: Радио и связь, 9.
2. А.С. Чиркин. Методы факторизации унитарного оператора параметрических взаимодействий/ МГУ, физический факультет, учебное пособие, 2021
3. Д.Н. Фроловцев, С.А. Магницкий, and А.В. Дёмин. Квантовый томограф для измерения и характеристики квантовых состояний бифотонных источников. *Измерительная техника*, (4):20–26, 2020]
4. Sergey Magnitskiy, Dmitriy Agapov, and Anatoly Chirkin. Ghost polarimetry with unpolarized pseudo-thermal light. *Optics Letters*, 45(13):3641–3644, 2020.
5. Александр Львовский. Отличная квантовая механика. В 2-х томах. Перевод с английского Наталии Лисовой, Издательство «Альпина нон-фикшн», 2019, 442 стр

Интернет-ресурсы.

- <https://labmsu.koddys.ru/subject/>

Материально-техническое обеспечение

В соответствии с требованиями п.5.3. образовательного стандарта МГУ по направлению подготовки «Физика».

Для лекционной части курса требуются аудитория, оборудованная мультимедийным проектором, интерактивной доской, и управляющим компьютером. Также необходимо наличие экрана и обычной учебной доски.