Приложение 10

Утверждено Приказом ФИЦ КазНЦ РАН

от \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ № \_\_\_\_\_\_

Разработано и рекомендовано к утверждению

Ученым советом КФТИ – обособленного структурного подразделения ФИЦ КазНЦ РАН

«22» января 2025 г., протокол №2

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ**

**«Квантовая оптика»**

Составная часть

**основной профессиональной образовательной программ**

**высшего образования -**

**программы подготовки научных и научно-педагогических кадров**

**в аспирантуре**

Научная специальность

**1.3.6 Оптика (физико-математические науки)**

**Содержание**

1. Виды учебной деятельности, способ и формы ее проведения, трудоемкость дисциплины.

2. Перечень планируемых результатов обучения.

3. Место дисциплины в структуре образовательной программы.

4. Содержание дисциплины.

5. Учебно-тематический план занятий.

6. Формы текущего контроля, критерии оценки.

7. Перечень учебной литературы и ресурсов сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины.

8. Описание материально-технической базы, необходимой для освоения дисциплины.

**1. Виды учебной деятельности, способ и формы ее проведения, трудоемкость дисциплины**

Виды учебной деятельности: аудиторные занятия – 27 часов, самостоятельная работа – 92 часа, зачет - 1 час, всего – 120 часов.

Форма проведения аудиторных занятий – лекции, семинары и консультации.

В рамках часов самостоятельной работы по указанию преподавателя аспиранты прорабатывают темы и осваивают теоретические вопросы, излагаемые в лекционном курсе, а также самостоятельно изучают другие вопросы программы.

Формой итогового контроля является зачет.

**2. Перечень планируемых результатов обучения**

В результате освоения дисциплины выпускник должен

***Знать:***

* методы критического анализа и оценки современных научных достижений, а также методы генерирования новых идей при решении исследовательских и практических задач в области квантовой оптики;
* роль и место квантовой оптики в формировании современной физической картины мира, стадии их эволюции и взаимосвязь с другими разделами физики;
* особенности научной терминологии, понятийный аппарат квантовых оптических технологий, используемые при представлении результатов научной деятельности в устной и письменной форме;
* основы нерелятивистской квантовой теории света и взаимодействия света с веществом;
* фундаментальные закономерности, связанные с распространением квантовых состояний электромагнитного поля в веществе, с процессами поглощения, излучения и рассеяния света, а также нелинейно-оптическими явлениями, которые описываются в формализме квантовой теории излучения;
* существующие методы и методические подходы в научных исследованиях в области квантовой оптики и возможные способы их развития;

***Уметь:***

* анализировать альтернативные варианты решения практических задач в области квантовых оптических технологий и оценивать потенциальные выигрыши/проигрыши реализации этих вариантов;
* выбирать и применять при решении задач в области квантовой оптики адекватные экспериментальные и расчетно-теоретические методы исследования;

***Владеть:***

* навыками поиска (в том числе с использованием информационных систем и баз данных) и критического анализа информации в области квантовой оптики;
* навыками проведения базовых квантово-оптических экспериментов с использованием современной аппаратуры и методов интерпретации экспериментальных результатов.

**3. Место дисциплины в структуре образовательной программы**

Дисциплина «Квантовая оптика» является элективной и/или факультативной дисциплиной и включена в Блок «Образовательная компонента» основных профессиональных образовательных программ высшего образования – программ подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре по научной специальности 1.3.6 Оптика. Обучение планируется на втором и/или третьем курсе.

Данная дисциплина базируется на знаниях и умениях, выработанных при прохождении общих профессиональных курсов по высшей математике, общей физике и теоретической физике (разделы: «Квантовая механика», «Оптика», «Атомная физика», «Статистическая физика») и спецкурсов в рамках магистерской программы образования или специалитета по физике. Аспирант должен обладать навыками самостоятельного освоения изучаемого материала.

**4. Содержание дисциплины**

**Целью**дисциплины «Квантовая оптика» является формирование у аспирантов базы знаний в области фундаментального раздела современной физики – квантовой оптики. Задачами курса являются: изучение основ нерелятивистской квантовой теории света и взаимодействия света с веществом, освоение наиболее известных теоретических методов, используемых при решении задач квантовой оптики, изучение фундаментальных закономерностей, связанных с распространением квантовых состояний электромагнитного поля в веществе, с процессами поглощения, излучения и рассеяния света, а также нелинейно-оптическими явлениями, которые описываются в формализме квантовой теории излучения; приобретение навыков проведения базовых квантовооптических экспериментов, знакомство с современной аппаратурой и методами интерпретации экспериментальных результатов; развитие у аспирантов навыков к выбору адекватных подходов при решении задач квантовой оптики Актуальность курса обусловлена большой ролью современной квантовой оптики в исследовании фундаментальных проблем квантовой механики и в развитии квантовых информационных технологий. Дисциплина направлена на подготовку к сдаче кандидатского экзамена по специальной дисциплине 1.3.6 Оптика.

**5. Учебно-тематический план занятий**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **№**  **п/п** | **Наименование темы** | **Аудит. занятия** | **Самост.**  **работа** | **Всего**  **часов** |
|  | **Квантование электромагнитного поля**  Основные уравнения. Интегралы движения. Переход в импульсное представление. Нормальные переменные. Каноническое квантование свободного электромагнитного поля. Коммутационные соотношения для полевых операторов. Квантовые уравнения Максвелла. | **4** | **15** | **19** |
|  | **Квантовые состояния электромагнитного поля**  1. Собственные энергетические состояния. Представление чисел заполнения. Когерентные состояния. Представления по когерентным состояниям. Сжатые состояния. Оператор сжатия. Сжатый вакуум и сжатые когерентные состояния. Проблема фазы в квантовой оптике. Вакуумные флуктуации и сила Казимира.  2. Однофотонные и бифотонные волновые пакеты. Перепутанные состояния поля. Критерии перепутанности. Разложение Шмидта. Меры перепутанности. Двухмодовый сжатый вакуум.  3. Состояния поля с отличным от нуля угловым моментом. | **4** | **15** | **19** |
|  | **Взаимодействие атомов с полем.**  1. Двухуровневый атом. Энергетический спин. Гамильтониан взаимодействия атома с электромагнитным полем. Дипольное приближение. dE- и pA-формы гамильтониана.  2. Модель Джейнса-Каммингса. Осцилляции Раби. Коллапс и возрождение инверсии. Теория спонтанного излучения Вайскопфа-Вигнера. Лэмбовский сдвиг. Резонансная флуоресценция. Одетые состояния. Дисперсионное взаимодействие. Эксперименты с ридберговскими атомами.  3. Полуклассическое приближение и оптические уравнения Блоха. Векторная модель взаимодействия двухуровневого атома с когерентным полем. Трёхуровневые атомы и эффекты квантовой интерференции. Расщепление Аутлера-Таунса. Когерентное пленение населённостей. STIRAP. | **4** | **15** | **19** |
|  | **Открытые квантовые системы**  1. Обобщённое основное кинетическое уравнение. Основное кинетическое уравнение Паули. Уравнение Фоккера–Планка. Квантовые траектории. Уравнение Гейзенберга–Ланжевена.  2. Связанные резонаторы. Формализм входа–выхода. Квантовые уравнения Ланжевена для открытого резонатора. Атом в открытом резонаторе и эффект Парсела.  3. Квантовые отображения и квантовые каналы. Представление Крауса. Декогеренция. Прямые и косвенные квантовые измерения. Неразрушающие квантовые измерения. | **5** | **15** | **20** |
|  | **Фотодетектирование. Статистика фотонов и фотоотсчётов.**  Методы фотодетектирования. Идеальный фотодетектор. Вероятность фотоотсчета и корреляционная функция первого порядка. Вероятность совместного фотоотсчета и корреляционная функция второго порядка. Свойства корреляционных функций и степеней когерентности. Статистика фотоэлектрического счета. Формула Манделя. Интерферометр Хенберри Брауна – Твисса. Корреляции и антикорреляции фотоотсчетов. Группировка и антигруппировка фотонов. | **5** | **16** | **21** |
|  | **Квантовая интерференция. Теорема Белла.**  Матрицы рассеяния для основных элементов оптических цепей (светоделитель, поляризатор, фазовая пластина). Интерферометр Брауна и Твисса. Интерферометр Хонга–Оу–Манделя. Интерферометр Маха–Цендера. Измерение без взаимодействия. Балансное гомодинное детектирование. Повышение точности интерференционных измерений за счёт использования сжатых состояний. Квантовая литография. Интерферометр Франсона. Парадокс Эйнштейна–Подольского–Розена. Локальный реализм. Теорема Белла. Равенство Гринбергера–Хорна–Цайлингера. | **5** | **16** | **21** |
|  | ЗАЧЕТ | **1** | **-** | **1** |
| ВСЕГО | | **28** | **92** | **120** |

**6. Формы текущего контроля, критерии оценки**

**6.1. Итоговый контроль:** формой итогового контроля по дисциплине является Зачет.

Текущий контроль освоения дисциплины проводится регулярно, начиная со второй недели обучения, в форме контроля посещаемости, устного опроса по теме, анализа результатов решения практических задач и выполненных лабораторных работ.

Промежуточный контроль подразумевает проведение коллоквиума по учебному материалу нескольких тем.

**Контрольные темы и вопросы для проведения текущего и итогового контроля:**

**Тема 1 Квантование электромагнитного поля:**

Уравнения Максвелла–Лоренца. Полная энергия. Полный импульс. Полный момент импульса. Переход в импульсное представление. Нормальные переменные. Каноническое квантование свободного электромагнитного поля. Коммутационные соотношения для полевых операторов. Квантовые уравнения Максвелла.

**Тема 2 Квантовые состояния электромагнитного поля:**

Собственные энергетические состояния. Представление чисел заполнения. Когерентные состояния. Представления по когерентным состояниям. Сжатые состояния. Оператор сжатия. Сжатый вакуум и сжатые когерентные состояния. Проблема фазы в квантовой оптике. Вакуумные флуктуации и сила Казимира. Однофотонные и бифотонные волновые пакеты. Перепутанные состояния поля. Критерии перепутанности. Разложение Шмидта. Меры перепутанности. Двухмодовый сжатый вакуум. Состояния поля с отличным от нуля угловым моментом.

**Тема 3 Взаимодействие атомов с полем:**

Двухуровневый атом. Энергетический спин. Гамильтониан взаимодействия атома с электромагнитным полем. Дипольное приближение. dE- и pA-формы гамильтониана. Модель Джейнса–Каммингса. Осцилляции Раби. Коллапс и возрождение инверсии. Теория спонтанного излучения Вайскопфа–Вигнера. Лэмбовский сдвиг. Резонансная флуоресценция. Одетые состояния. Дисперсионное взаимодействие. Эксперименты с ридберговскими атомами. Полуклассическое приближение и оптические уравнения Блоха. Векторная модель взаимодействия двухуровневого атома с когерентным полем. Трёхуровневые атомы и эффекты квантовой интерференции. Расщепление Аутлера-Таунса. Когерентное пленение населённостей. STIRAP.

**Тема 4 Открытые квантовые системы:**

Обобщённое основное кинетическое уравнение. Основное кинетическое уравнение Паули. Уравнение Фоккера–Планка. Квантовые траектории. Уравнение Гейзенберга–Ланжевена. Связанные резонаторы. Формализм входа-выхода. Квантовые уравнения Ланжевена для открытого резонатора. Атом в открытом резонаторе и эффект Парсела. Квантовые отображения и квантовые каналы. Представление Крауса. Декогеренция. Прямые и косвенные квантовые измерения. Неразрушающие квантовые измерения.

**Тема 5 Фотодетектирование. Статистика фотонов и фотоотсчётов:**

Методы фотодетектирования. Идеальный фотодетектор. Вероятность фотоотсчета и корреляционная функция первого порядка. Вероятность совместного фотоотсчета и корреляционная функция второго порядка. Свойства корреляционных функций и степеней когерентности. Статистика фотоэлектрического счета. Формула Манделя. Интерферометр Хенберри Брауна–Твисса. Корреляции и антикорреляции фотоотсчетов. Группировка и антигруппировка фотонов.

**Тема 6 Квантовая интерференция. Теорема Белла:**

Матрицы рассеяния для основных элементов оптических цепей (светоделитель, поляризатор, фазовая пластина). Интерферометр Брауна и Твисса. Интерферометр Хонга–Оу–Манделя. Интерферометр Маха–Цендера. Измерение без взаимодействия. Балансное гомодинное детектирование. Повышение точности интерференционных измерений за счёт использования сжатых состояний. Квантовая литография. Интерферометр Франсона. Парадокс Эйнштейна–Подольского–Розена. Локальный реализм. Теорема Белла. Равенство Гринбергера–Хорна–Цайлингера.

**6.2. Критерии оценки итогового контроля:**

|  |  |
| --- | --- |
| Оценка | Требования к знаниям и критерии выставления  оценок: |
| **зачтено** | Аспирант при ответе демонстрирует знание тем учебной дисциплины, владеет основными понятиями и терминами, знает особенности развития соответствующей области науки, имеет представление о специфике объектов исследований. Информирован о современных направлениях работ, ознакомлен с содержанием основных литературных источников, способен делать анализ проблем и намечать пути их решения. |
| **не зачтено** | Аспирант демонстрирует плохое знание большей части основного материала в соответствующей области науки. Не информирован или слабо разбирается в проблемах, и не в состоянии наметить пути их решения. |

**При выборе аспирантом дисциплины «Квантовая оптика» в качестве элективной, зачет по дисциплине является допуском к промежуточной аттестации – кандидатскому экзамену по специальной дисциплине.**

**7. Учебно-методическое обеспечение**

**7.1. Литература**

1. Клаудер Дж., Сударшан Э. Основы квантовой оптики. – М.: Мир, 1970.
2. Мандель Л., Вольф Э. Оптическая когерентность и квантовая оптика. – М.: Физматлит, 2000.
3. Скалли М., Зубайри С. Квантовая оптика. – М.: Физматлит, 2003.

**7.2. Дополнительная литература**

1. Ахманов С.А., Дьяков Ю.Е., Чиркин А.С. Введение в статистическую радиофизику и оптику: учеб. пособие. – М.: Наука, 1981.
2. Дмитриев В.Г., Тарасов Л.В. Прикладная нелинейная оптика, 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Физматлит, 2004.
3. Ельяшевич М.А. Атомная и молекулярная спектроскопия. – М.: Физматгиз, 1962.
4. Калачев А.А., Самарцев В.В. Когерентные явления в оптике. – Казань: КГУ им. В.И. Ульянова-Ленина, 2003.
5. Шен И.Р. Принципы нелинейной оптики. – М.: Наука, 1989.

**7.3. Электронные ресурсы**

**I. НЕКОММЕРЧЕСКИЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ БИБЛИОТЕЧНЫЕ СИСТЕМЫ (ЭБС) СВОБОДНОГО ДОСТУПА**

• Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU www.elibrary.ru

• Электронная библиотека «Научное наследие России» http://www.e-heritage.ru/index.html

• Научная электронная библиотека КиберЛенинка http://www.cyberleninka.ru/

• Полнотекстовая электронная библиотека РФФИ http://www.rfbr.ru/rffi/ru/library

• Электронная библиотека ИФТТ РАН http://www.issp.ac.ru/libcatm/elib.html

• Электронная библиотека международного научно-образовательного сайта EqWorld – http://eqworld.ipmnet.ru/indexr.htm

• Библиотека международного издательства INTECHOPEN – http://www.intechopen.com/

**II. РЕФЕРАТИВНЫЕ БАЗЫ ДАННЫХ НАУЧНЫХ ИЗДАНИЙ И НАУЧНЫЕ ПОИСКОВЫЕ СИСТЕМЫ**

• Российский индекс научного цитирования (РИНЦ) http://elibrary.ru/project\_risc.asp

• Международная реферативная база по физике, астрономии, теории частиц ADS(NASA) http://adsabs.harvard.edu/

• Directory of Open Access Journals (DOAJ) http://www.doaj.org

• Directory of Open Access Books (DOAB) http://doabooks.org/

• ArXiv: Open access to 1,146,534 e-prints in Physics, Mathematics, Computer Science, Quantitative Biology, Quantitative Finance and Statistics (Электронный архив публикаций библиотеки Корнелльского университета) http://xxx.lanl.gov/archive

• Science Research Portal – научно-поисковая система, осуществляющая полнотекстовый поиск в журналах многих крупных научных издательств, таких как Elsevier, Highwire, IEEE, Nature, Taylor & Francis и др., в открытых научных базах данных: Directory of Open Access Journals, Library of Congress Online Catalog, Science.gov и Scientific News http://www.scienceresearch.com

**III. ЖУРНАЛЫ И КНИГИ**

• Nature Communications http://www.nature.com/ncomms/index.html

• Physical Review X http://journals.aps.org/prx/

• Scientific Reports http://www.nature.com/srep/

• New Journal of Physics http://iopscience.iop.org/journal/1367-2630

• Журналы физико-технического института им А.Ф. Йоффе РАН: «Журнал технической физики», «Письма в журнал технической физики», «Физика твердого тела», «Физика и техника полупроводников» http://journals.ioffe.ru/

• Труды института общей физики им. А.М. Прохорова РАН http://www.gpi.ru/trudgpi.php

• Physics Books – Free Computer Books http://www.freebookcentre.net/Physics/Physics-Books-Online.html

• List of Free Physics Books | Physics Database http://physicsdatabase.com/free-physics-book

**IV. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ И СПРАВОЧНЫЕ РЕСУРСЫ «ИНТЕРНЕТ»**

* Российское магнитное общество http://www.amtc.ru/mago/
* European community of Magnetism http://magnetism.eu
* International Society of Magnetic Resonance https://www.weizmann.ac.il/ISMAR/education
* ETH Zurich group about EPR http://www.epr.ethz.ch
* Molecular magnetism http://www.molmag.de
* Magnetic Resonance Imaging http://www.magnetic-resonance.org
* Техническая библиотека http://techlibrary.ru/
* Библиотека Гумер. Гуманитарные науки. http://www.gumer.info/bibliotek\_Buks/Pedagog/
* Федеральный портал «Российское образование» www.edu.ru
* Информационная система «Единое окно доступа к образовательным ресурсам» http://window.edu.ru/
* Специализированный портал по информационно-коммуникационным технологиям в образовании http://www.ict.edu.ru/
* Информационная справочно-правовая система «Консультант плюс» http://www.consultant.ru/ (некоммерческая версия)
* Справочно-информационный портал ГРАМОТА.РУ <http://www.gramota.ru/>
* <http://gerdbreitenbach.de/gallery/> – Введение в квантовую оптику
* <http://steck.us/teaching> – D.A. Steck. Quantum and atom optics
* <http://www.youtube.com/watch?v=dQmaJPVP0hE> – Лекция нобелевского лауреата Роя Глаубера
* <http://www.rp-photonics.com/encyclopedia.html> – Энциклопедия лазерной физики и технологии
* <http://www.quantiki.org/> – Энциклопедия по квантовой информатике

**8. Описание материально-технической базы, необходимой для освоения дисциплины**

Аудиторные занятия, самостоятельная работа по освоению дисциплины и подготовка к сдаче зачета и кандидатского экзамена проводятся в специальных помещениях (читальный зал научной библиотеки, лабораторные комнаты), оборудованных мебелью (столы, стулья), компьютерами с доступом к сети Интернет, демонстрационным оборудованием.

Обучение по дисциплине ведётся с применением как традиционных методов (лекции, лабораторные работы), так и с использованием инновационных подходов: активное участие аспирантов в научных семинарах подразделений КФТИ – обособленного структурного подразделения ФИЦ КазНЦ РАН по профилю подготовки, представление докладов на научной конференции молодых ученых КФТИ – обособленного структурного подразделения ФИЦ КазНЦ РАН и молодежных научных школах, подготовка научных статей, подготовка презентаций по литературе для дополнительного изучения.

Аудиторные занятия, целью которых является освоение теоретических основ дисциплины, проводятся в интерактивной форме с использованием мультимедийного оборудования. Презентации позволяют качественно иллюстрировать практические занятия схемами, формулами, чертежами, рисунками. Кроме того, презентации позволяют четко структурировать материал занятия. Электронная презентация позволяет отобразить процессы в динамике, что позволяет улучшить восприятие материала. Практические занятия (семинары) имеют своей целью освоение расчетно-теоретических методов, используемых при решении задач квантовой оптики, а также развития навыков рационального выбора методов решения. В ходе лабораторных занятий аспирантам предоставляется возможность на практике освоить технику проведения базовых квантовооптических экспериментов, изучить специфику экспериментальных исследований в области квантовой оптики, познакомится с принципами работы и возможностями экспериментальной аппаратуры и оборудования, используемого при проведении научных исследований в области квантовой оптики, а также методами интерпретации экспериментальных результатов.

Самостоятельная работа аспирантов подразумевает углубленное освоение теоретического материала, выполнение индивидуальных заданий, подготовку к текущему, промежуточному и итоговому контролю успеваемости. В целях формирования способности к критическому анализу информации и поиску путей решения поставленных задач в дальнейшей профессиональной деятельности используется технология проблемного обучения, требующая значительных временных ресурсов, что предусмотрено структурой дисциплины, и предполагает самостоятельную проработку учебно-проблемных задач аспирантами, выполняемую с привлечением основной и дополнительной литературы; поиск необходимой научно-технической информации в открытых источниках, консультации с преподавателем.

Самостоятельная работа аспирантов осуществляется: в домашних условиях, в читальном зале библиотеки, на персональных рабочих местах аспирантов с доступом к ресурсам «Интернет», в научных подразделениях КФТИ – обособленного структурного подразделения ФИЦ КазНЦ РАН с доступом к лабораторному оборудованию и приборам.

Самостоятельная работа подкрепляется учебно-методическим и информационным обеспечением, включающим учебники, учебно-методические пособия, конспекты лекций, ресурсы «Интернет».

**Материально-техническое обеспечение дисциплины:**

- библиотека с читальным залом, книжный фонд которой составляет специализированная методическая и учебная литература, научная периодика;

- зал, оснащённый стационарным проектором, экраном и обычной доской – для проведения лекционных занятий;

- учебная аудитория, оснащенная переносными проектором и экраном для проведения практических занятий;

- индивидуальные рабочие места аспирантов, оснащенные персональным компьютерами с доступом к сети «Интернет», локальной сети и электронной информационно-образовательной среде ФИЦ КазНЦ РАН.

В учебном процессе аспиранты используют современное научное оборудование профильных подразделений КФТИ – обособленного структурного подразделения ФИЦ КазНЦ РАН:

* центра коллективного пользования лаборатории быстропротекающих молекулярных процессов – лазерные системы, спектрометры, детекторы оптического излучения и наборы оптических элементов, позволяющие комбинировать различные оптические схемы;
* лаборатории нелинейной оптики – измерительный комплекс для исследования корреляционных функций второго и четвертого порядка в схеме интерферометра интенсивностей Брауна–Твисса.