Приложение 11

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**

**«Квантовые оптические технологии»**

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 квантовых оптических технологий;
* роль и место квантовых оптических технологий 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 квантовой теории информации, квантовых вычислений и связи;
* закономерности распространения квантовых состояний света в различных средах и закономерности взаимодействия электромагнитного поля с перспективными носителями квантовой информации;
* существующие методы и методические подходы к реализации квантовых вычислений 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 квантовых оптических технологий 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 квантовых оптических технологий;
* навыками анализа протоколов квантовой связи и квантовых вычислений, анализа оптических квантовых схем, интерпретации результатов квантовооптических измерений.

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

Дисциплина «Квантовые оптические технологии» 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 «Магнитный резонанс» является является формирование у аспирантов базы знаний в области актуального раздела квантовой оптики и информатики – квантовых оптических технологий. Задачами курса являются: изучение основ квантовой теории информации, квантовых вычислений и связи; изучение методов генерации, записи и воспроизведения неклассических состояний света, методов детектирования однофотонных состояний, изучение закономерностей распространения квантовых состояний света в различных средах; изучение закономерностей взаимодействия электромагнитного поля с перспективными носителями квантовой информации. Актуальность курса обусловлена быстрым развитием квантовых оптических технологий, позволяющих создавать принципиально новые оптические устройства и приборы, функционирующие на основе законов квантовой механики. 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** |
|  | **Основные понятия квантовой теории информации**  1. Кубит. Геометрическое представление состояния кубита. Чистые и смешанные состояния кубита. Перепутанное состояние двух кубитов. Разложение Шмидта. Критерий сепарабельности. Меры информации и перепутанности. Энтропия и информация.  2. Однокубитовые и двухкубитовые вентили. Представление произвольного многокубитового вентиля через одно- и двухкубитовые. Универсальные наборы квантовых вентилей.  3. Эволюция открытой квантовой системы. Динамическое отображение. Представление Крауса. Квантовые каналы. Квантовые измерения. Проекционные и POVM-измерения | **9** | **30** | **39** |
|  | **Квантовые вычисления и связь**  1. Сетевая модель квантовых вычислений. Вычисление функций. Квантовый параллелизм. Алгоритм Дойча. Алгоритм Гровера. Квантовое преобразование Фурье. Квантовый алгоритм нахождения периода функции. Классы сложности. Квантовая телепортация, однонаправленные квантовые вычисления и кластерные состояния.  2. Декогерентность. Перепутывание между кубитом и окружением. Пространства, свободные от декогеренции. Теорема о невозможности клонирования. Квантовые коды исправления ошибок. Коды с тремя и семью кубитами. Устойчивое к сбоям вычисление. Пороговая теорема.  3. Сверхплотное кодирование. Обмен перепутыванием. Квантовое распределение ключа. Квантовые повторители. | **9** | **31** | **40** |
|  | **Квантовые оптические технологии**  1. Источники однофотонных и перепутанных двухфотонных состояний света. Одиночные квантовые системы (квантовые точки, холодные атомы, дефекты в алмазе). Источники на основе спонтанного параметрического рассеяния и четырёхволнового смешения. Методы мультиплексирования.  2. Методы детектирования однофотонных состояний. Фотоэлектронные умножители. Лавинные фотодиоды. Сверхпроводниковые детекторы. Преобразование фотонов по частоте. Определение величины углового момента.  3. Оптическая квантовая память. Методы записи и воспроизведения квантовых состояний на основе нерезонансного рамановского взаимодействия, фотонного эха и электромагнитно-индуцированной прозрачности. Перспективные носители квантовой информации.  4. Оптическая квантовая связь. Оптоволоконный и атмосферный квантовые каналы. Экспериментальные реализации квантовой телепортации и квантового распределения ключа. Варианты атак и оценка безопасности. Аппаратно-независимая квантовая криптография.  5. Оптические квантовые вычисления. Однокубитовые вентили. Двухкубитовые вентили. Линейные оптические квантовые вычисления. Оптические реализации кластерных состояний и однонаправленных квантовых вычислений.  6. Гибридные схемы квантовых вычислений. Интерфейс между оптическими и сверхпроводниковыми кубитами. | **9** | **31** | **40** |
|  | 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 Основные понятия квантовой теории информации:**

Кубит. Геометрическое представление состояния кубита. Чистые и смешанные состояния кубита. Перепутанное состояние двух кубитов. Разложение Шмидта. Критерий сепарабельности. Меры информации и перепутанности. Энтропия и информация. Однокубитовые и двухкубитовые вентили. Представление произвольного многокубитового вентиля через одно- и двухкубитовые. Универсальные наборы квантовых вентилей. Эволюция открытой квантовой системы. Динамическое отображение. Представление Крауса. Квантовые каналы. Квантовые измерения. Проекционные и POVM-измерения.

**Тема 2 Квантовое вычисление и связь:**

Сетевая модель квантовых вычислений. Вычисление функций. Квантовый параллелизм. Алгоритм Дойча. Алгоритм Гровера. Квантовое преобразование Фурье. Квантовый алгоритм нахождения периода функции. Классы сложности. Квантовая телепортация, однонаправленные квантовые вычисления и кластерные состояния. Декогерентность. Перепутывание между кубитом и окружением. Пространства, свободные от декогеренции. Теорема о невозможности клонирования. Квантовые коды исправления ошибок. Коды с тремя и семью кубитами. Устойчивое к сбоям вычисление. Пороговая теорема. Сверхплотное кодирование. Обмен перепутыванием. Квантовое распределение ключа. Квантовые повторители.

**Тема 3 Квантовые оптические технологии:**

Источники однофотонных и перепутанных двухфотонных состояний света. Одиночные квантовые системы (квантовые точки, холодные атомы, дефекты в алмазе). Источники на основе спонтанного параметрического рассеяния и четырёхволнового смешения. Методы мультиплексирования. Методы детектирования однофотонных состояний. Фотоэлектронные умножители. Лавинные фотодиоды. Сверхпроводниковые детекторы. Преобразование фотонов по частоте. Определение величины углового момента. Оптическая квантовая память. Методы записи и воспроизведения квантовых состояний на основе нерезонансного рамановского взаимодействия, фотонного эха и электромагнитно-индуцированной прозрачности. Перспективные носители квантовой информации. Оптическая квантовая связь. Оптоволоконный и атмосферный квантовые каналы. Экспериментальные реализации квантовой телепортации и квантового распределения ключа. Варианты атак и оценка безопасности. Аппаратно-независимая квантовая криптография. Оптические квантовые вычисления. Однокубитовые вентили. Двухкубитовые вентили. Линейные оптические квантовые вычисления. Оптические реализации кластерных состояний и однонаправленных квантовых вычислений. Гибридные схемы квантовых вычислений. Интерфейс между оптическими и сверхпроводниковыми кубитами.

**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 «Квантовые оптические технологии» в качестве элективной, зачет по дисциплине является допуском к промежуточной аттестации – кандидатскому экзамену по специальной дисциплине.**

**7. Учебно-методическое обеспечение**

**7.1. Литература**

1. Балаж Ф., Имре Ш. Квантовые вычисления и связь. Инженерный подход. – М.: Физматлит, 2008
2. Валиев К.А., Кокин А.А. Квантовые компьютеры: возможность и ожидания. – Ижевск: РХД, 2001
3. Калачев А.А. Квантовая информатика в задачах. – Казань: КГУ, 2012
4. Калачев А.А. Спонтанное параметрическое рассеяние и задачи. – Казань: КГУ, 2012
5. Мандель Л., Вольф Э. Оптическая когерентность и квантовая оптика. – М.: Физматлит, 2000.
6. Новотный Л., Хехт Б., Основы нанооптики. Пер. с англ. А.А. Коновко, О.А. Шутовой; Под ред. В. В. Самарцева. – М.: Физматлит, 2009
7. 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.

**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://www.quiprocone.org/Protected/DD_lectures.htm> – Лекции David Deutsch
* <https://www.youtube.com/playlist?list=PL1826E60FD05B44E4> – Лекции Michael Nielsen
* <http://www.theory.caltech.edu/people/preskill/ph229> – Preskill J. Quantum computation and information (Caltech, 1998)
* <http://www.rp-photonics.com/encyclopedia.html> – Энциклопедия лазерной физики и технологии
* <http://www.quantiki.org/> – Энциклопедия по квантовой информатике
* <http://en.wikipedia.org/wiki/Quantum_computer> – Статья в Википедии, посвященная квантовым компьютерам.

**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 в области квантовых оптических технологий, а также развития навыков рационального выбора методов решения. В ходе лабораторных занятий аспирантам предоставляется возможность на практике освоить технику проведения базовых экспериментов, изучить специфику экспериментальных исследований в области квантовых оптических технологий, познакомится с принципами работы и возможностями экспериментальной аппаратуры и оборудования, используемого при проведении научных исследований в области квантовых оптических технологий, 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.