

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

УТВЕРЖДЕНО

приказом ФИЦ КазНЦ РАН

от 01.03.2019 № 9-А

Разработано и рекомендовано к утверждению
Ученым советом

КФТИ - обособленного структурного
подразделения ФИЦ КазНЦ РАН

28 ноября 2018 г., протокол № 33

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

«Квантовые оптические технологии»

Уровень высшего образования

Подготовка кадров высшей квалификации

Направление подготовки

03.06.01 ФИЗИКА И АСТРОНОМИЯ

Направленность подготовки:

01.04.05 – Оптика

Квалификация выпускника:

Исследователь. Преподаватель-исследователь

Содержание:

1. Виды учебной деятельности, способ и формы ее проведения.
2. Перечень планируемых результатов обучения.
3. Место дисциплины в структуре образовательной программы.
4. Трудоемкость дисциплины.
5. Содержание дисциплины.
6. Формы текущего контроля и промежуточной аттестации, фонд оценочных средств.
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

Виды учебной деятельности: аудиторные занятия 1 зачетная единица труда (36 часов), самостоятельная работа 6 зачетных единиц труда (216 часов), всего 7 зачетных единиц труда (252 часа).

Форма проведения аудиторных занятий – лекции и семинары.

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.

2. Перечень планируемых результатов обучения

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование следующих компетенций:

универсальных

- способность к критическому анализу и оценке современных научных достижений, генерированию новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях (УК-1);
- способность проектировать и осуществлять комплексные исследования, в том числе междисциплинарные, на основе целостного системного научного мировоззрения с использованием знаний в области истории и философии науки (УК-2);
- готовность участвовать в работе российских и международных исследовательских коллективов по решению научных и научнообразовательных задач (УК-3);

общепрофессиональных

- способность самостоятельно осуществлять научно-исследовательскую деятельность в соответствующей профессиональной области с использованием современных методов исследования и информационно-коммуникационных технологий (ОПК-1);

профессиональных

- способность проводить самостоятельные исследования природы света и явлений при его распространении и взаимодействии с веществом, владеть современными методами оптической спектроскопии, а также разрабатывать новые оптические методы исследования фундаментальных свойств материи, новые коммерческие/промышленные оптические технологии и методы диагностики природных либо техногенных объектов и процессов (ПК-1);
- способность принимать участие в разработке новых методов и методических подходов в научных исследованиях в области оптики (ПК-3).

В результате освоения дисциплины аспирант 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 (*шифр формируемого результата обучения З(УК-1)-1*);
- роль и место квантовых оптических технологий в формировании современной физической картины мира, стадии их эволюции и взаимосвязь с другими разделами физики (*шифр формируемого результата обучения З(УК-2)-2*);
- особенности научной терминологии, понятийный аппарат квантовых оптических технологий, используемые при представлении результатов научной деятельности в устной и письменной форме (*шифр формируемого результата обучения З(УК-3)-1*);
- основы квантовой теории информации, квантовых вычислений и связи (*шифр формируемого результата обучения З(ПК-1)-1*);
- закономерности распространения квантовых состояний света в различных средах и закономерности взаимодействия электромагнитного поля с перспективными носителями квантовой информации (*шифр формируемого результата обучения З(ПК-1)-1*);
- существующие методы и методические подходы к реализации квантовых вычислений и возможные способы их развития (*шифр формируемого результата обучения З(ПК-3)-1*).

Уметь:

- анализировать альтернативные варианты решения практических задач в области квантовых оптических технологий и оценивать потенциальные выигрыши/проигрыши реализации этих вариантов (*шифр формируемого результата обучения У(УК-1)-1*);
- выбирать и применять при решении задач в области квантовых оптических технологий адекватные экспериментальные и расчетно-теоретические методы исследования (*шифр формируемого результата обучения У(ОПК-1)-1*).

Владеть:

- навыками поиска (в том числе с использованием информационных систем и баз данных) и критического анализа информации в области квантовых оптических технологий (*шифр формируемого результата обучения В(ОПК-1)-1*);
- навыками анализа протоколов квантовой связи и квантовых вычислений, анализа оптических квантовых схем, интерпретации результатов квантовооптических измерений (*шифр формируемого результата обучения В(ПК-1)-1*).

3. Место дисциплины в структуре образовательной программы

Целью дисциплины «Квантовые оптические технологии» 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.

Дисциплина относится к **дисциплинам по выбору**, входит в состав Блока 1 «Дисциплины (модули)» и относится к вариативной части ОПОП аспирантуры по направлению 03.06.01 «Физика и астрономия», направленность (профиль) 01.04.05 «Оптика». Индекс (по учебному плану) – **Б1.В.ДВ2**. Дисциплина изучается в 3 и 4 семестрах.

Актуальность курса обусловлена быстрым развитием квантовых оптических технологий, позволяющих создавать принципиально новые оптические устройства и приборы, функционирующие на основе законов квантовой механики.

Материал, изучаемый в ходе освоения дисциплины, в значительной мере дополняет и расширяет ряд разделов обязательной дисциплины «Квантовая оптика». Изучение данной дисциплины базируется на вузовской подготовке студентов по высшей математике, общей физике и теоретической физике (разделы: «Квантовая механика», «Оптика», «Атомная физика», «Статистическая физика»).

4. Трудоемкость дисциплины

Общая трудоемкость дисциплины составляет 7 зачетных единиц, в том числе 1 ЗЕ аудиторных занятий и 6 ЗЕ самостоятельной работы.

№	Дисциплина	Курс	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу аспирантов и трудоемкость (в часах)			
			Лекции	Практические занятия	Лабораторные занятия	Самостоятельная работа
1	Квантовые оптические технологии	2	20	12	4	216

5. Содержание дисциплины

5.1 Лекционные занятия

(аудиторная нагрузка 20 часов, самостоятельная работа 120 часов)

№ п/п	Наименование раздела дисциплины	Содержание раздела
1.	Основные понятия квантовой теории информации	<p>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.</p> <p>2. Однокубитовые и двухкубитовые вентили. Представление произвольного многокубитового вентиля через одно- и двухкубитовые. Универсальные наборы квантовых вентилей.</p> <p>3. Эволюция открытой квантовой системы. Динамическое отображение. Представление Крауса. Квантовые каналы. Квантовые измерения. Проекционные и POVM-измерения</p>
2.	Квантовые вычисления и связь	<p>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.</p> <p>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.</p> <p>3. Сверхплотное кодирование. Обмен перепутыванием. Квантовое распределение ключа. Квантовые повторители.</p>
3.	Квантовые оптические технологии	<p>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.</p>

		<p>2. Методы детектирования однофотонных состояний. Фотоэлектронные умножители. Лавинные фотодиоды. Сверхпроводниковые детекторы. Преобразование фотонов по частоте. Определение величины углового момента.</p> <p>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.</p> <p>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.</p> <p>5. Оптические квантовые вычисления. Однокубитовые вентили. Двухкубитовые вентили. Линейные оптические квантовые вычисления. Оптические реализации кластерных состояний и однонаправленных квантовых вычислений.</p> <p>6. Гибридные схемы квантовых вычислений. Интерфейс между оптическими и сверхпроводниковыми кубитами.</p>
--	--	---

5.2. Лабораторные занятия

(аудиторная нагрузка 4 часа, самостоятельная работа 24 часа)

№ п/п	Наименование раздела дисциплины	Примеры выполняемых экспериментальных работ
1	Квантовые оптические технологии	Абсолютная калибровка однофотонных детекторов с помощью спонтанного параметрического рассеяния
2	Квантовые оптические технологии	Измерение автокорреляционной функции второго порядка поля спонтанного параметрического рассеяния

5.3. Практические занятия

(аудиторная нагрузка 12 часов, самостоятельная работа 72 часа)

№ п/п	Тематика семинаров	Трудоёмкость (часы)
1.	Микрорезонаторы. Интегральные оптические схемы.	4
2.	Оптические нановолокна. Фотоннокристаллические волокна.	2
3.	Метаматериалы	2
4.	Лазерное охлаждение	2
5	Медленный свет.	2

6. Формы текущего контроля и промежуточной аттестации, фонд оценочных средств

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.

Формой итогового контроля по дисциплине является зачет.

6.1. Текущий контроль: Контрольные темы и вопросы для проведения текущего и итогового контроля по дисциплине «Квантовые оптические технологии»:

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 вентилях. 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 и шкала оценивания результатов освоения дисциплины «Квантовые оптические технологии»:

№ п/п	Результат освоения дисциплины	Балл	Показатели оценивания
Знание			
1.	методов критического анализа и оценки современных научных достижений, а также методов генерирования новых идей при решении исследовательских и практических задач в области квантовых оптических технологий	1	недостаточный уровень знания
		2	достаточный уровень знания
		3	высокий уровень знания
2.	роли и места квантовых оптических технологий в формировании современной физической картины мира,	1	недостаточный уровень знания
		2	достаточный уровень знания

	стадии ее эволюции и взаимосвязи с другими разделами физики	3	высокий уровень знания
3.	особенностей научной терминологии, понятийного аппарата квантовых оптических технологий, используемых при представлении результатов научной деятельности в устной и письменной форме	1	недостаточный уровень знания
		2	достаточный уровень знания
		3	высокий уровень знания
4.	основ квантовой теории информации, квантовых вычислений и связи	1	недостаточный уровень знания
		2	достаточный уровень знания
		3	высокий уровень знания
5.	закономерности распространения квантовых состояний света в различных средах и закономерности взаимодействия электромагнитного поля с перспективными носителями квантовой информации	1	недостаточный уровень знания
		2	достаточный уровень знания
		3	высокий уровень знания
6.	существующие методы и методические подходы к реализации квантовых вычислений и возможные способы их развития	1	недостаточный уровень знания
		2	достаточный уровень знания
		3	высокий уровень знания
Умение			
1.	анализировать альтернативные варианты решения практических задач квантовых оптических технологий и оценивать потенциальные выигрыши/проигрыши реализации этих вариантов	1	не умеет
		2	частично освоенное умение
		3	сформированное умение
2.	выбирать и применять при решении задач квантовых оптических технологий адекватные экспериментальные и расчетно-теоретические методы исследования	1	не умеет
		2	частично освоенное умение
		3	сформированное умение

Владение			
1.	навыками поиска (в том числе с использованием информационных систем и баз данных) и критического анализа информации в области квантовых оптических технологий	1	не владеет
		2	частично освоенные навыки
		3	сформированные навыки
2.	навыками анализа протоколов квантовой связи и квантовых вычислений, анализа оптических квантовых схем, интерпретации результатов квантовооптических измерений	1	не владеет
		2	частично освоенные навыки
		3	сформированные навыки
Итого баллов		20–30	«зачтено»
		менее 20	«не зачтено»

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

7.1. ОСНОВНАЯ 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. ПЕРЕЧЕНЬ РЕСУРСОВ ИНФОРМАЦИОННО-ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ «ИНТЕРНЕТ»

- <http://arxiv.org/> – Архив препринтов
- 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

Обучение по дисциплине ведётся с применением как традиционных методов (лекции, практические занятия, лабораторные работы), так и с использованием инновационных подходов: активное участие аспирантов в научных семинарах подразделений КФТИ – обособленное структурное подразделение ФИЦ КазНЦ РАН по профилю подготовки, представление докладов на научной конференции молодых ученых КФТИ – обособленное структурное подразделение 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, познакомиться 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 – обособленное структурное подразделение 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.