

Приложение № 4 к основной профессиональной образовательной программе высшего образования программа подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре по направлению подготовки кадров высшей квалификации 12.06.01 «Фотоника, приборостроение, оптические и биотехнические системы и технологии» направленность «Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы»

Федеральное агентство научных организаций

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук (ИАиЭ СО РАН)

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИАиЭ СО РАН

академик А.М. Шалагин



«16» сентября 2014 г.

Рабочая программа дисциплины

«ОПТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ КВАНТОВОЙ ИНФОРМАТИКИ»

Основная профессиональная образовательная программа высшего образования
Программа подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре по направлению подготовки кадров высшей квалификации

12.06.01 «Фотоника, приборостроение, оптические и биотехнические системы и технологии»

направленность **«Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы»**

Форма обучения - очная

Новосибирск 2014 г.

Рабочая программа составлена на основании федерального государственного образовательного стандарта высшего образования по направлению подготовки 12.06.01 Фотоника, приборостроение, оптические и биотехнические системы и технологии (уровень подготовки кадров высшей квалификации) утвержденной приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 30 июля 2014 г. №877

Составители рабочей программы

к.ф.-м.н.

Бетеров И.И.

Рабочая программа утверждена на заседании Ученого совета ИАиЭ СО РАН

«16» сентября 2014 г., протокол №14-08

Председатель Ученого совета, академик, профессор

Шалагин А.М.

Секретарь Ученого совета, д.т.н.

Михляев С.В.

СОГЛАСОВАНО:

Зам. директора Института, д.ф.-м.н.

Бабин С.А.

Зав. лаб., д.т.н.,

Лабусов В.А.

1 Цели и задачи освоения дисциплины

Цели:

Дисциплина «Оптические технологии квантовой информатики» (индекс по учебному плану Б1.В.ОД.2) является специальной дисциплиной подготовки аспирантов по направлению подготовки 12.06.01 Фотоника, приборостроение, оптические и биотехнические системы и технологии (уровень подготовки кадров высшей квалификации) направленность «Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы» и имеет своей целью овладение основными понятиями, моделями, теоретическими и экспериментальными методами квантовой информатики и знакомство с современным состоянием данной области науки.

Задачи:

1. Углубленное изучение теоретических принципов квантовой информатики в соответствии с требованиями ФГОС ВО (уровень подготовки кадров высшей квалификации) по направлению подготовки «Фотоника, приборостроение, оптические и биотехнические системы и технологии».

2. Развитие практических навыков решения задач в области квантовой информатики и квантовой оптики, применения оптических методов для реализации квантовых вычислений.

3. Формирование у аспирантов представления о современных фундаментальных и прикладных проблемах квантовой информатики, проблемах приложения методов квантовой оптики и лазерной спектроскопии для реализации квантовых вычислений.

4. Формирование у аспирантов представления о теоретических основах квантовых информационных технологий, включая фундаментальные принципы и базовые понятия квантовой информатики, методы управления состояниями индивидуальных квантовых систем, проблемах и перспективах экспериментальной реализации квантовых вычислений.

5. Ознакомление аспирантов с научно-техническими достижениями в области экспериментальной квантовой информатики.

2 Место дисциплины в структуре основной профессиональной образовательной программы послевузовского профессионального образования (аспирантура)

Дисциплина «Оптические технологии квантовой информатики» является обязательной, входит в состав Блока 1 «Дисциплины (модули)» и относится к вариативной части ООП по направлению подготовки 12.06.01 «Фотоника, приборостроение, оптические и биотехнические системы и технологии», направленность «Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы». Индекс дисциплины - Б1.В.ОД.2. Курс «Оптические технологии квантовой информатики» изучается на втором курсе аспирантуры (I и II семестры); изложение материала опирается также на знание аспирантами квантовой механики и основ физической и нелинейной

оптики и физики лазеров; обеспечена логическая связь курса «Оптические технологии квантовой информатики» с другими курсами.

Взаимосвязь курса с другими дисциплинами ООП способствует углубленной подготовке аспирантов к решению специальных практических профессиональных задач и формированию необходимых компетенций

3 Требования к уровню подготовки аспиранта, завершившего изучение данной дисциплины

Процесс изучения дисциплины «Оптические технологии квантовой информатики» направлен на формирование следующих компетенций:

Код компетенции	Формулировка компетенции из ФГОС	Планируемые результаты обучения (показатели достижения заданного уровня освоения компетенций)
ОПК-1	способностью идентифицировать новые области исследований, новые проблемы в сфере профессиональной деятельности с использованием анализа данных мировых информационных ресурсов, формулировать цели и задачи научных исследований	Уметь: вести научную дискуссию ; оценивать основные преимущества и ограничения различных схем квантовых вычислений
ОПК-2	способностью предлагать пути решения, выбирать методику и средства проведения научных исследований	Знать технику лазерного охлаждения и захвата атомов и ионов. Уметь анализировать схемы реализации квантовых логических операций и квантовых алгоритмов.
ОПК-3	владением методикой разработки математических и физических моделей исследуемых процессов, явлений и объектов, относящихся к профессиональной сфере	Знать: - основные физические процессы, связанные с когерентным взаимодействием лазерного излучения с отдельными квантовыми системами.
ПК-1	Способность к созданию новых методов для физических исследований с использованием оптического излучения, высокоточных измерений, средств передачи и обработки информации	Знать: - теоретические основы квантовой информатики.
ПК-2	способность разрабатывать теоретические модели и выполнять численное моделирование оптических процессов в классических и квантовых системах	Знать: •основные понятия, используемые в оптической спектроскопии; •основы спектрального анализа, поглощения и испускания спектра атомом, молекулой
ПК-3	способность к теоретическим и экспериментальным	Знать технику эксперимента с индивидуальными квантовыми системами.

	исследованиям в области лазерных систем и лазерных технологий, оптических методов измерения и контроля	Владеть: <ul style="list-style-type: none"> • представлением состояния квантовых битов на сфере Блоха, матричным представлением однокубитовых и двухкубитовых операций; • основными квантовыми алгоритмами • методами оценки точности квантовых вычислений
ПК-4	Способность разрабатывать, совершенствовать и исследовать характеристики приборов, систем и комплексов с использованием электромагнитного излучения оптического диапазона волн, предназначенных для измерения физических величин, контроля параметров различных объектов и сред, а также обработки и отображения информации	Уметь: определять характеристики спектральных приборов; Владеть: <ul style="list-style-type: none"> • методами управления квантовыми состояниями индивидуальных атомных систем • методами измерения состояния квантовых систем.

4 Объем дисциплины, содержание и структура дисциплины

Общая трудоемкость дисциплины составляет **5** зачетных единиц, 180 часов.

Тема	Лекции, (ч)	Самостоят. работа, (ч)	Формы контроля
Год обучения 2			
Раздел 1. Основные понятия квантовой информатики			
<i>Введение в предмет. Цели и задачи курса, его общая структура. Современная информатика. Закон Мура. Диссипация энергии при вычислениях. Двухуровневые системы. Кубиты. Квантовые коммуникации. Декогеренция. Принципиальная схема квантового компьютера. История квантовой информатики. Квантовые алгоритмы и их реализация.</i>	2	9	

<p><i>Классическая и квантовая информатика.</i> Физические ограничения классических компьютеров. Энтропия и демон Максвелла. Обратимые и необратимые операции. Универсальные логические операции. Минимальный набор необратимых операций. Минимальный набор обратимых операций. Вентиль CNOT. Вентиль Тоффоли. Машина Тьюринга. Классы сложности вычислительных задач. Двумерное гильбертово пространство. Кубиты, спин, фотоны. Матрица плотности. Сфера Блоха. Перепутанные состояния. Парадокс Эйнштейна-Подольского-Розена. Состояния Белла. Теорема о невозможности копирования квантового состояния. Измерения в квантовой физике. Копенгагенская интерпретация. Многочастичное перепутывание.</p>	4	20	
<p><i>Кубиты и квантовые вентили.</i> Однокубитовые вращения. Композиция вращений. Двухкубитовые операции. Композитные операции. Универсальные наборы квантовых логических операций. Унитарные операции.</p>	2	10	Реферат
<p>Раздел 2. Квантовые алгоритмы.</p>			
<p><i>Общие принципы квантовых вычислений.</i> Преимущества квантовых вычислений. Квантовые алгоритмы. Квантовое преобразование Фурье. Квантовые алгоритмы поиска. Алгоритм Дойча-Джоза. Алгоритм Шора. Проблема факторизации больших чисел. Алгоритм Гровера.</p>	6	30	
<p><i>Квантовые симуляторы.</i> Потребность в квантовых симуляторах. Эволюция квантовых систем. Оценка фазы.</p>	2	9	
<p><i>Квантовая коррекция ошибок.</i> Источники ошибок. Декогеренция. Полуклассическое описание. Квантовомеханические модели. Перепутывание и смешивание. Классическая коррекция ошибок. Квантовая коррекция ошибок. Переворачивание спина. Фазовые ошибки. Общий случай. Стабилизирующие коды. Проблема масштабирования.</p>	2	10	Реферат
<p>Раздел 3. Физическая реализация квантового компьютера</p>			
<p><i>Принципы реализации квантового компьютера.</i> Кубиты. Инициализация. Время декогеренции. Квантовые вентили. Измерения состояний кубита. Превращение квантовой информации в классическую. Клеточные автоматы. Однонаправленные квантовые вычисления. Критерии ди Винченцо. Квантовый гармонический осциллятор.</p>	2	9	

<i>Примеры физических реализаций.</i> Ядерный магнитный резонанс. Реализация алгоритма Шора. Ядерный магнитный резонанс в твердом теле. Сверхпроводящие кубиты. Квантовые точки.	2	10	
<i>Оптическая реализация квантовых вычислений.</i> Принципы лазерного охлаждения. Ловушки для ионов и атомов. Взаимодействие резонансного лазерного излучения с атомными системами. Квантовые вычисления с нейтральными ультрахолодными атомами. Оптические решетки и оптические дипольные ловушки. Бозе-Эйнштейновская конденсация. Ридберговская блокада и двухкубитовые операции. Методы измерений. Точность квантовых логических операций с нейтральными атомами. Фотоны в качестве кубитов. Резонаторная квантовая электродинамика для квантовой информатики.	6	30	
<i>Квантовая криптография.</i> Источники одиночных и перепутанных фотонов. Квантовая телепортация. Квантовая передача ключа одиночными фотонами. Алгоритм BB84. Фазовое кодирование.	2	9	Экзамен

В учебном процессе используются активные и интерактивные формы занятий в сочетании с внеаудиторной работой. Удельный вес занятий, проводимых в интерактивных формах, составляет не менее 30% аудиторных занятий.

В рамках изучения данной дисциплины реализация компетентностного подхода предусматривает широкое использование в учебном процессе традиционных образовательных технологий, активных и интерактивных форм проведения занятий в сочетании с внеаудиторной работой с целью формирования и развития профессиональных навыков обучающихся.

В рамках изучения данной дисциплины используются: мультимедийные образовательные технологии: интерактивные лекции (презентации);

5 Самостоятельная работа аспирантов

Основной формой деятельности аспирантов по дисциплине является самостоятельная проработка конспектов лекций и вопросов, вынесенных на самостоятельное изучение, с помощью основной и дополнительной литературы с привлечением компьютерных средств, а также индивидуальные занятия с преподавателем, направленные на практические исследования по представленным темам. В ходе изучения дисциплины используется численное моделирование атомных систем, взаимодействующих с резонансным лазерным излучением. Предусмотрено обязательное участие в заседаниях семинара Учебно-научного центра «Квантовая оптика».

Вопросы для самостоятельного изучения:

Раздел 1. Основные понятия квантовой информатики

1. Изучить основные однокубитовые и двухкубитовые операции. Рассмотреть однокубитовые вращения на произвольный угол вокруг произвольной оси, их интерпретацию на сфере Блоха.
2. Изучить представление состояний кубита в виде матрицы плотности, отличие чистых и смешанных состояний кубита.
3. Доказать теорему о невозможности копирования квантового состояния.
4. Изучить композицию вращений. Показать, что вращение кубита вокруг оси Z можно представить в виде композиции вращений вокруг осей X и Y .
5. Изучить парадокс Эйнштейна-Подольского-Розена и его интерпретацию в современной квантовой физике.

Раздел 2. Квантовые алгоритмы.

1. Изучить самостоятельно основные квантовые алгоритмы: квантовое преобразование Фурье, алгоритм Дойча-Джоза, алгоритм Шора, алгоритм Гровера.
2. Изучить самостоятельно, какие физические задачи могут быть решены с использованием квантовых симуляторов.
3. Изучить основные методы квантовой коррекции ошибок при реализации квантовых алгоритмов.

Раздел 3. Физическая реализация квантового компьютера.

1. Сравнить преимущества и недостатки различных реализаций квантового компьютера на основе критериев ди Винченцо. Оценить, какая реализация является наиболее перспективной.
2. Получить аналитическое выражение для динамики населенностей двухуровневой системы, взаимодействующей с резонансным лазерным излучением.
3. Оценить температуру атомов рубидия в магнито-оптической ловушке (доплеровский предел охлаждения).

6 Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

Основная литература:

1. Хренников А.Ю. Введение в квантовую теорию информации. – Физматлит, 2008.
2. Акулин, В.М. Динамика сложных квантовых систем [Электронный ресурс] : монография. — Электрон. дан. — М. : Физматлит, 2009. — 489 с.

Дополнительная литература:

1. Р.Ф.Фейнман, Квантовомеханические компьютеры. Пер. с англ. Сборник «Квантовые

компьютеры и квантовые вычисления». РХД, Ижевск, 1999.

Методическая литература:

1. Киселев, Г.Л. Квантовая и оптическая электроника [Электронный ресурс] : . — Электрон. дан. — СПб. : Лань, 2011. — 314 с.

Научные статьи:

1. M.Saffman, T.Walker, K.Molmer, Quantum Information with Rydberg Atoms, Review of Modern Physics, v.82, p.2313, 2010.
2. I.I.Ryabtsev, D.B.Tretyakov, I.I.Beterov, Applicability of Rydberg Atoms to Quantum Computers, J. Phys. B., v.38, p.S421, 2005.

Интернет-ресурсы:

1. Сайт препринтов www.arxiv.org
2. Ресурсы Wikipedia
3. Ресурсы Энциклопедия фотоники:

<https://www.rp-photonics.com/encyclopedia.html>

Веб-сайты с электронными ресурсами:

1. eLIBRARY.RU [Электронный ресурс]: научная электронная библиотека. – URL: <http://www.elibrary.ru>
2. ibooks.ru [Электронный ресурс]: электронно-библиотечная система. – URL: <http://ibooks.ru>
3. Издательство «Лань» [Электронный ресурс]: электронно-библиотечная система. – URL: <http://e.lanbook.com/>
4. Единая коллекция цифровых образовательных ресурсов [Электронный ресурс]. – URL: <http://scool-collection.edu.ru>
5. Единое окно доступа к образовательным ресурсам [Электронный ресурс]. – URL: <http://window.edu.ru>
6. Znaniium.com [Электронный ресурс]: электронно-библиотечная система. – URL: <http://znaniium.com>
7. Антиплагиат [Электронный ресурс]. – Режим доступа – URL: <http://www.antiplagiat.ru/index.aspx>
8. Электронная библиотека СГУ <http://library.sgu.ru/>
9. Электронная библиотека физико-технического института им. А.И. Иоффе. Санкт-Петербург http://www.rasl.ru/b_resours/set/fismat_set/ftispb.php
10. Электронная полнотекстовая библиотека Ихтика http://ihtik.lib.ru/2011.08_ihtik_nauka-tehnika/

Программное обеспечение:

OS MS Windows, MS Office 2007, Adobe Reader

7 Материально-техническое обеспечение дисциплины

Обучение аспирантов происходит в Учебном центре Института автоматки и электрометрии СО РАН, созданном совместно Новосибирским университетом. Учебный центр состоит из трех классов, в которых походят лекционные занятия, а также классы доступны более 30 часов в неделю для самостоятельной подготовки аспирантов. Классы укомплектованы 20 компьютерами, оснащены оборудованием для проведения практических и лабораторных занятий (программирование микроконтроллеров, практикум по схемотехнике с использованием паяльного оборудования) и оборудован системой вентиляции. В классах имеется демонстрационное оборудование (мультимедиа- и оверхед-проекторы) и звуковая система для проведения видеоконференций.

8 Оценочные средства для текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины

Формы текущего контроля работы аспирантов

Формами текущего контроля работы аспирантов по дисциплине «Оптические технологии квантовой информатики» являются: реферат.

Порядок осуществления текущего контроля

Текущий контроль выполнения заданий осуществляется регулярно, начиная с 3 недели семестра. Контроль и оценивание выполнения рефератов осуществляется по завершению тем. Система текущего контроля успеваемости служит в дальнейшем наиболее качественному и объективному оцениванию в ходе промежуточной аттестации.

Промежуточная аттестация по дисциплине

Промежуточная аттестация не предусматривается.

Вопросы к экзамену.

1. Принципиальная схема универсального квантового компьютера. Универсальный набор однокубитовых и двухкубитовых операций. Перепутанные состояния в квантовой информатике.
2. Квантовые алгоритмы. Квантовое преобразование Фурье. Примеры оптической реализации.
3. Квантовые алгоритмы факторизации больших чисел. Алгоритм Шора. Примеры оптической реализации.
4. Квантовые алгоритмы поиска в неупорядоченных базах данных. Алгоритм Гровера. Примеры оптической реализации.
5. Квантовые симуляторы и методы оценки фазы. Примеры оптической реализации.
6. Методы квантовой коррекции ошибок. Стабилизирующие коды.
7. Критерии ди Винченцо и примеры физической реализации квантовых вычислений.

8. Оптические методы реализации однокубитовых и двухкубитовых логических операций.
9. Принципы лазерного охлаждения и захвата атомов и ионов. Холодные атомы и ионы для квантовой информатики.
10. Взаимодействие резонансного лазерного излучения с веществом. Использование лазерного излучения для однокубитовых и двухкубитовых операций.
11. Методы квантовой томографии для анализа квантовых состояний и процессов.
11. Теорема о невозможности копирования квантового состояния. Квантовая криптография. Протокол BB84.
12. Однонаправленные квантовые вычисления.
13. Источники перепутанных фотонов. Схемы квантовой телепортации.
14. Твердотельные и оптические методы реализации квантовых вычислений: сравнительный анализ.

Задачи к экзамену

1. Предложите такие начальные состояния контролирующего и контролируемого кубита, чтобы конечное состояние двух кубитов после выполнения операции CNOT оказалось перепутанным.
2. Изобразите состояние $\frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle - |1\rangle)$ на сфере Блоха. Как выглядит матрица плотности для такого состояния? Чем она отличается от матрицы плотности смешанного состояния, для которого вероятности найти логический кубит в состояниях 0 и 1 равны?
3. Представьте операцию вращения кубита вокруг оси Z как суперпозицию вращений вокруг осей X и Y.
4. Получите выражение, описывающее преобразование матрицы плотности в результате операции CNOT.
5. Получите выражение для операции «Вентиль Адамара», выполняемой с n кубитами, в операторной и матричной форме.
6. Покажите, что среднее значение наблюдаемой $X_1 Z_2$ для состояния $\frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle)$ равно нулю.
7. Нарисуйте схему последовательности квантовых вентилях, реализующих обратное квантовое преобразование Фурье. Объясните действие данной схемы.
8. Нарисуйте схему выполнения вентиля Адамара с оптическими фотонами с использованием поляризационных светоделителей. Объясните действие данной схемы.
9. Предложите схему выполнения двухкубитовой операции CNOT на основе ридберговской блокады. Объясните действие данной схемы.

10. Покажите, что в режиме ридберговской блокады частота осцилляций Раби для двух атомов возрастает в $\sqrt{2}$ раз.

11. Получите выражение для глубины оптического потенциала в оптической дипольной ловушке, если известна частота и интенсивность лазерного излучения, и дипольный момент перехода.

12. Получите выражение для оператора взаимодействия двухуровневого атома с лазерным излучением во вращающейся системе отсчета.

13. Покажите, что когерентное состояние является собственным для оператора уничтожения в квантовом гармоническом осцилляторе.

Темы рефератов.

1. Квантовая информатика и фундаментальные проблемы квантовой физики.
2. Критерии ди Винченцо и различные физические реализации квантовых вычислений.
3. Важнейшие квантовые алгоритмы.
4. Квантовые симуляторы для сложных физических задач.
5. Экспериментальные методы реализации квантовых вычислений на основе нейтральных атомов.
6. Экспериментальные методы реализации квантовых вычислений с использованием одиночных фотонов.
7. Методы квантовой коррекции ошибок и точность квантовых вычислений.
8. Квантовая криптография.
9. Квантовые вычисления на сверхпроводниках: является ли D-Wave квантовым компьютером.
10. Резонаторная электродинамика для квантовых вычислений.
11. Квантовые вычисления с одиночными атомами и мезоскопическими атомными ансамблями.
12. Современная критика реализуемости квантовых вычислений.
13. Нобелевские премии и квантовая информатика: влияние выдающихся достижений в физике на развитие научного направления.

Критерии оценивания.

<i>Зачтено</i>	<i>Не зачтено</i>
Успешное и системное владение навыками: - выбора методов решения теоретических задач, - сбора, обработки, анализа и систематизации знаний о физических явлениях в области квантовой информатики, квантовой оптики, атомной спектроскопии. - постановки и проведения экспериментальных	Фрагментарное владение навыками: - выбора методов решения теоретических задач; - сбора, обработки, анализа и систематизации знаний о физических явлениях в области квантовой информатики, квантовой оптики, атомной спектроскопии; - постановки и проведения экспериментальных

<p>исследований в области оптической квантовой информатики;</p> <p>Сформированные и системные умения применять:</p> <ul style="list-style-type: none"> - основные физические положения квантовой информатики, квантовой оптики, атомной спектроскопии в решении теоретических задач; - математический аппарат, компьютерные программные средства для теоретического и численного моделирования оптических процессов в квантовых системах; - теоретические положения физических процессов в оптических системах в экспериментальных исследованиях; - оптические системы, аналоговые и цифровые системы записи и обработки сигналов в экспериментальных исследованиях. <p>Сформированные и системные знания:</p> <ul style="list-style-type: none"> - основных физических положений квантовой информатики, квантовой оптики, атомной физики; - физических и математических основ теоретического и численного моделирования оптических процессов в квантовых системах; - физических принципов лазерного охлаждения и захвата атомов и ионов; - методов и средств экспериментальной реализации квантовых вычислений. 	<p>исследований в области оптической квантовой информатики;</p> <p>Фрагментарные умения применять:</p> <ul style="list-style-type: none"> - основные физические положения квантовой информатики, квантовой оптики, атомной спектроскопии в решении теоретических задач; - математический аппарат, компьютерные программные средства для теоретического и численного моделирования оптических процессов в квантовых системах; - теоретические положения физических процессов в оптических системах в экспериментальных исследованиях; - оптические системы, аналоговые и цифровые системы записи и обработки сигналов в экспериментальных исследованиях. <p>Фрагментарные знания:</p> <ul style="list-style-type: none"> - основных физических положений квантовой информатики, квантовой оптики, атомной физики; - физических и математических основ теоретического и численного моделирования оптических процессов в квантовых системах; - физических принципов лазерного охлаждения и захвата атомов и ионов; - методов и средств экспериментальной реализации квантовых вычислений.
<p>Отметка «зачтено» ставится аспирантам, успешно выполнившим в процессе обучения все текущие задания, полностью и обоснованно ответившие на вопросы промежуточной аттестации в соответствии с нижеприведенными критериями оценивания результатов обучения.</p> <p>Сформированные знания:</p> <ul style="list-style-type: none"> - основных физических положений квантовой информатики, квантовой оптики, атомной физики; - физических и математических основ теоретического и численного моделирования оптических процессов в квантовых системах; - физических принципов лазерного охлаждения и захвата атомов и ионов; - методов и средств экспериментальной реализации квантовых вычислений. <p>Сформированные умения применять:</p> <ul style="list-style-type: none"> - основные физические положения квантовой информатики, квантовой оптики, атомной спектроскопии в решении теоретических задач; - математический аппарат, компьютерные программные средства для теоретического и численного моделирования оптических процессов в квантовых системах; - теоретические положения физических процессов в оптических системах в экспериментальных исследованиях; - оптические системы, аналоговые и цифровые системы записи и обработки сигналов в экспериментальных исследованиях. <p>Успешное и системное владение и применение навыков: сбора, обработки и анализа информации, ориентации в источниках и научной литературе, логики и терминологии научного исследования;</p> <ul style="list-style-type: none"> - выбора методов решения теоретических задач; - сбора, обработки, анализа и систематизации 	<p>Отметка «не зачтено» ставится аспиранту, не выполнившему в полном объеме все текущие задания или допустившие существенные неточности при ответе на вопросы, не сумевшему обосновать ответы в соответствии с ниже приведенными критериями оценивания результатов обучения.</p> <p>Фрагментарные знания:</p> <ul style="list-style-type: none"> - основных физических положений квантовой информатики, квантовой оптики, атомной физики; - физических и математических основ теоретического и численного моделирования оптических процессов в квантовых системах; - физических принципов лазерного охлаждения и захвата атомов и ионов; - методов и средств экспериментальной реализации квантовых вычислений. <p>Фрагментарные умения применять:</p> <ul style="list-style-type: none"> - применять основные физические положения квантовой информатики, квантовой оптики, атомной спектроскопии в решении теоретических задач; - математический аппарат, компьютерные программные средства для теоретического и численного моделирования оптических процессов в квантовых системах; - теоретические положения физических процессов в оптических системах в экспериментальных исследованиях; - оптические системы, аналоговые и цифровые системы записи и обработки сигналов в экспериментальных исследованиях. - анализировать варианты решения исследовательских задач. <p>Фрагментарное владение и применение навыков:</p> <ul style="list-style-type: none"> - выбора методов решения теоретических задач;

<p>знаний о физических явлениях в области квантовой информатики, квантовой оптики, атомной спектроскопии;</p> <p>- постановки и проведения экспериментальных исследований в области оптической квантовой информатики</p>	<p>- сбора, обработки, анализа и систематизации знаний о физических явлениях в области квантовой информатики, квантовой оптики, атомной спектроскопии;</p> <p>- постановки и проведения экспериментальных исследований в области оптической квантовой информатики</p>
--	---