

**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» (модуль оптика)**

Основная профессиональная образовательная программа высшего образования

Программа подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре по направлению

подготовки кадров высшей квалификации

**3.06.01 «Физика и астрономия»**

направленность **«Оптика»**

Форма обучения - очная

Новосибирск 2014 г.

## **1 Цели и задачи освоения дисциплины**

Цели:

Дисциплина «Оптические технологии квантовой информатики» (модуль оптика, индекс по учебному плану Б1.В.ДВ.2) является дисциплиной по выбору подготовки аспирантов по направлению подготовки 03.06.01 Физика и астрономия (уровень подготовки кадров высшей квалификации) направленность «Оптика» 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 «Физика и астрономия».

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 дисциплиной по выбору, входит в состав Блока 1 «Дисциплины (модули)» и относится к части ООП по направлению подготовки 03.06.01 «Физика и астрономия», направленность «Оптика». Индекс дисциплины - Б1.В.ДВ.2. Курс «Оптические технологии квантовой информатики» изучается на первом 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	способность самостоятельно осуществлять научно-исследовательскую деятельность в соответствующей профессиональной области с использованием современных методов исследования и информационно-коммуникационных технологий	Уметь: вести научную дискуссию ; оценивать основные преимущества и ограничения различных схем квантовых вычислений
УК-1	способность к критическому анализу и оценке современных научных достижений, генерированию новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях	Знать технику лазерного охлаждения и захвата атомов и ионов. Уметь анализировать схемы реализации квантовых логических операций и квантовых алгоритмов.
ПК-3	способность к постановке и проведению экспериментальных исследований с использованием волоконно-оптических систем, аналоговых и цифровых систем записи и обработки сигналов и изображений	Знать методы проведения экспериментов в области квантовых технологий, оптические методы обработки информации. Уметь проводить экспериментальные исследования оптическими методами.

### 4 Объем дисциплины, содержание и структура дисциплины

Общая трудоемкость дисциплины составляет **1 зачетных единиц, 36 часов.**

Тема	Лекции, (ч)	Самостоят. работа, (ч)	Формы контроля
<b>Год обучения 2</b>			
<b>Раздел 1. Основные понятия квантовой информатики</b>			
<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.</i>	2	9	

Принципиальная схема квантового компьютера. История квантовой информатики. Квантовые алгоритмы и их реализация.			
<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.	4	20	
<i>Кубиты и квантовые вентили.</i> Однокубитовые вращения. Композиция вращений. Двухкубитовые операции. Композитные операции. Универсальные наборы квантовых логических операций. Унитарные операции.	2	10	
<b>Раздел 2. Квантовые алгоритмы.</b>			
<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.	6	30	
<i>Квантовые симуляторы.</i> Потребность в квантовых симуляторах. Эволюция квантовых систем. Оценка фазы.	2	9	
<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.	2	10	
<b>Раздел 3. Физическая реализация квантового компьютера</b>			
<i>Принципы реализации квантового компьютера.</i> Кубиты. Инициализация. Время декогеренции. Квантовые вентили. Измерения состояний кубита. Превращение квантовой информации в классическую. Клеточные автоматы.	2	9	

Однонаправленные квантовые вычисления. Критерии ди Винченцо. Квантовый гармонический осциллятор.			
<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	

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](http://www.arxiv.org)

2. Ресурсы Wikipedia

3. Ресурсы Энциклопедия фотоники:

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

## **7 Материально-техническое обеспечение дисциплины**

Обучение аспирантов происходит в Учебном центре Института автоматизации и электрометрии СО РАН, созданном совместно Новосибирским университетом. Учебный центр состоит из трех классов, в которых проходят 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.

### **Программное обеспечение:**

OS MS Windows, MS Office 2007, Adobe Reader

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

### **Формы текущего контроля работы аспирантов**

Текущий контроль не предусмотрен.

### **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.