

Приложение № 3 к Основной профессиональной образовательной программе высшего образования программа подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре по направлению подготовки кадров высшей квалификации 03.06.01 «Физика и астрономия» направленность «Оптика»

**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

**«ПРОДВИНУТЫЙ КУРС КВАНТОВОЙ ОПТИКИ»**

Основная профессиональная образовательная программа высшего образования  
Программа подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре по направлению  
подготовки кадров высшей квалификации  
**03.06.01 «Физика и астрономия» направленность «Оптика»**

Форма обучения - очная

Новосибирск 2014 г.

Рабочая программа составлена на основании федерального государственного образовательного стандарта высшего образования по направлению подготовки 03.06.01 Физика и астрономия (уровень подготовки кадров высшей квалификации) утвержденной приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 30 июля 2014 г. №867

Составитель рабочей программы

В.н.с., д.ф.-м.н.

\_\_\_\_\_

Ильичев Л.В.

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.

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

Цели:

Дисциплина «Продвинутый курс квантовой оптики» (индекс по учебному плану Б1.В.ОД.2) модуля «Оптика» является специальной дисциплиной 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, теоретическими моделями, методами и базовыми экспериментальными результатами квантовой оптики и знакомство с современным состоянием данной области науки.

Задачи:

1. Углубленное изучение теоретических вопросов квантовой оптики в соответствии с требованиями ФГОС ВО (уровень подготовки кадров высшей квалификации) по направлению подготовки «Физика и астрономия».

2. Развитие практических навыков решения задач и чтения оригинальной журнальной литературы в области квантовой оптики, применения квантово-оптических методов в системах анализа вещества, передачи и обработки информации, в технологических и измерительных оптических системах.

3. Формирование у аспирантов представления о современных фундаментальных и прикладных проблемах квантовой оптики, её связи с лазерной физикой, проблемах приложения квантово-оптических методов исследования в науке и технике.

4. Формирование у аспирантов представления о теоретических основах квантово-оптических методов обработки информации (квантовые вычисления и квантовая коммуникация), об основных идеях и достижениях в этой области.

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

Дисциплина «Продвинутый курс квантовой оптики» является обязательной, входит в состав Блока 1 «Дисциплины (модули)» и относится к вариативной части ООП по направлению подготовки 03.06.01 «Физика и астрономия», направленность «Оптика». Индекс дисциплины - Б1.В.ОД.2. «Продвинутый курс квантовой оптики» (модуль оптика) изучается на втором курсе аспирантуры и является следующей ступенью в изучении квантовой оптики после магистерских курсов «Основы квантовой оптики» и «Современные проблемы квантовой оптики»; изложение материала опирается также на знание аспирантами основ электромагнитной теории света, физической и нелинейной оптики, физики лазеров и квантовой физики; обеспечена логическая связь «Продвинутого курса квантовой оптики» 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 «Продвинутый курс квантовой оптики» направлен на формирование следующих компетенций:

Код компетенции	Формулировка компетенции из ФГОС	Планируемые результаты обучения (показатели достижения заданного уровня освоения компетенций)
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	уметь анализировать текущие исследовательские задачи и полученные результаты, иметь способность предлагать решение поставленных задач, уметь выявлять научную новизну и практическую ценность проводимой работы
УК-2	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	владеть навыками постановки и проведения научных исследований, иметь целостное представление о значимости и актуальности работы, владеть методами критического анализа научной проблемы и современными подходами ведения научно-исследовательских работ
УК-3	готовность участвовать в работе российских и международных исследовательских коллективов по решению научных и научно-образовательных задач	владеть навыками постановки и проведения научных исследований, знать международное и российское положение по изучаемому направлению
УК-4	готовность использовать современные методы и технологии научной коммуникации на государственном и иностранном языках	отчуждать научные результаты через средства научной коммуникации структурировать тексты, описывающие научных результатов Знать основы базовых и перспективных технологий и экспериментов в квантовой оптике.
УК-5	способность планировать и решать задачи собственного профессионального и личностного развития	уметь планировать и решать поставленные задачи
ОПК-1	способность самостоятельно осуществлять научно-исследовательскую деятельность в соответствующей профессиональной области с	четко и уверенно излагать содержание выполненных исследований, аргументировано отвечать на вопросы и вести научную дискуссию уметь использовать современные приборы и

	использованием современных методов исследования и информационно-коммуникационных технологий	технологии для проведения исследований и обработки полученных результатов
ОПК-2	готовностью к преподавательской деятельности по основным образовательным программам высшего образования	Знать основные образовательные программы, уметь излагать материал по образовательным программам
ПК-1	способность к теоретическим исследованиям в области волновой и квантовой оптики, волоконной и нелинейной оптики, оптической спектроскопии, оптической обработки информации, оптических методов измерения и контроля	Умение проводить теоретические исследования в области волновой и квантовой оптики, оптической спектроскопии, оптической обработки информации. Уметь объяснить природу многофотонной интерференции на принципах, сходных с однофотонной интерференцией. Знать основные физические процессы, связанные с инженерией (приготовлением и контролем) квантово-оптических состояний; принципы работы основных квантово-оптических устройств и систем.
ПК-2	способность разрабатывать теоретические модели и выполнять численное моделирование оптических процессов в классических и квантовых системах	Уметь проводить расчёты квантовых оптических систем на основе аппарата когерентных состояний; преобразовывать друг в друга распределения Глаубера, Вигнера и Хушими для оптических квантовых состояний. Владеть: <ul style="list-style-type: none"> <li>• пониманием квантового кинетического уравнения для моды поля, его выводом и решением;</li> <li>• пониманием сжатого состояния, схемой его получения, обнаружения и применения;</li> <li>• содержанием основных алгоритмов квантовых вычислений;</li> <li>• основными идеями получения квантовых изображений на основе коррелированных фотонных пар;</li> <li>• пониманием фазы в квантовой оптике и пониманием причин многообразия подходов к этой проблеме; пониманием топологической фазы, и её основными типами в оптике.</li> </ul>
ПК-3	способность к постановке и проведению экспериментальных исследований с использованием волоконно-оптических систем, аналоговых и цифровых систем записи и обработки сигналов и изображений	Умение проводить экспериментальные исследования с использованием волоконно-оптических систем, аналоговых и цифровых систем записи и обработки сигналов и изображений

#### 4 Объем дисциплины, содержание и структура дисциплины

Общая трудоемкость дисциплины составляет **8** зачетных единицы, (**288** часов).

Тема	Лекции, (ч)	Самостоят. работа, (ч)	Формы контроля
<b>Год обучения 2</b>			
<b>Раздел 1. Элементы классической стохастической оптики</b>			
<i>Природа и характер флуктуаций электромагнитного поля в оптике – основные понятия. Статистический ансамбль источников и статистическое усреднение. Наличие двух характерных масштабов времени - оптического периода и времени флуктуаций. Соотношение между ними. Усреднение, проводимое прибором. Аналитический сигнал. Его польза в оптике при учёте усреднения прибором.</i>	2	4	
<i>Спектр сигнала в оптике. Корреляционная функция классического сигнала. Спектральная плотность мощности. Теорема Винера-Хинчина. Условия на корреляционную функцию и условия на спектральную плотность мощности.</i>	2	4	
<i>Классическая когерентность. Опыт Юнга. Функция взаимной когерентности (первого порядка). Возникновение когерентности при распространении излучения – основа метода измерения размеров космических источников излучения. Оценка поперечной длины когерентности от двух далёких независимых источников. Недостатки метода звёздной интерферометрии. "Интерференция интенсивностей" – прообраз двухфотонной интерференции. Схема Брауна-Твисса в простейшем примере двух далёких источников. Анализ интерференции в этой схеме (интерференция сценариев эволюции, а не фотонов на примере амплитуд двухфотонных процессов). Аналогия с (однофотонной) интерференцией в схеме Юнга.</i>	2	5	
<b>Раздел 2. Квантованное поле в оптике.</b>			
<i>Процедура квантования Гармонические полевые моды, их конфигурации в разложении напряжённости поля. Переход к оператору напряжённости поля. Превращение амплитуд полевых мод в операторы рождения и уничтожения фотонов. Выяснение формы гамильтониана свободного поля. Каноническое квантование. Варианты неканонического квантования. Глауберовская теория n-атомного детектора квантов на примере детектора с двумя атомами.</i>	4	9	
<i>Квантовая теория когерентности. Функции когерентности квантованного поля n-го порядка. Нормированная функция когерентности n-го порядка. Доказательство неравенства для модуля</i>	4	11	

<p>нормированной функции когерентности 1-ого порядка. Моды когерентности. Операторы рождения и уничтожения фотонов в модах когерентности. Доказательство равенства единице модуля нормированной функции когерентности при возбуждении одной моды когерентности. Доказательство обратного утверждения - факта возбуждения одной моды при равенстве единице модуля нормированной функции когерентности.</p>			
<p><i>Двухфотонная интерференция.</i> Физический смысл параметра когерентности в случае двух пространствен-временных точек. Понятие о группировке и антигруппировке фотонов. Случай одной моды. Доказательство неравенства для классического варианта нормированного параметра когерентности. Суперпуассоновские и субпуассоновские состояния одномодового поля. Связь дисперсии числа фотонов и нормированного параметра когерентности. Пример суперпуассоновского состояния - равновесного состояния гармонической моды. Квантовая область антигруппировки. Существование запретных областей для графиков зависимости квадрата дисперсии от среднего числа фотонов. Вывод уравнений для границ запретных областей. Вычисление максимального возможного числа фотонов при заданном значении антигруппировки.</p>	4	11	реферат
<p><i>Когерентные состояния квантованного поля.</i> Рассмотрение свойств состояния, собственного для положительно частотной части оператора напряжённости электромагнитного поля. Вывод определения когерентного состояния как собственного для оператора уничтожения фотонов в моде когерентности. Вывод коэффициентов разложения когерентных состояний по базису Фока. Неортогональность и полнота множества когерентных состояний. Глауберовское Р-представление полевой матрицы плотности. Характеристическая функция квантового состояния моды. Связь Р-функции совместного действия двух источников с Р-функциям источников.</p>	4	9	
<p><b>Раздел 3. Диссипация и необратимость в квантовой оптике</b></p>			
<p><i>Квантовое кинетическое уравнение.</i> Кинетическое уравнение для поля в пассивном резонаторе. Модель с быстрыми пролётами двухуровневых атомов через область поля. Трёхчленная структура Линдблада. Стационарное состояние полевой моды. Решение</p>	4	9	

<p>кинетического уравнения. переход от операторного уравнения к дифференциальному уравнению в частных производных типа Фоккера-Планка для Р-функции. Решение полученного уравнения для заданных начальных условий. Вычисление корреляционных функций амплитуд и интенсивностей с помощью вычисленной условной вероятности. Непрерывное детектирование квантованного поля. Связь распределения числа фотонов и статистики фотоиспусканий из пассивного резонатора.</p>			
<p><i>Разрушение когерентности в квантовой оптике.</i> Декогеренция как следствие возникновения квантовых корреляций (зацепленности) с некоторой внешней системой. Состояния поля типа «кошки Шрёдингера». Состояния Юрке-Столера. Их дуальность с состояниями Глаубера. Декогеренция состояний Юрке-Столера при уходе фотонов из резонатора. Способ предотвращения декогеренции с помощью системы квантовой обратной связи.</p>	2	7	реферат
<p><b>Раздел 4. Двухуровневый атом в квантованном поле</b></p>			
<p><i>Модель Джейнса-Каммингса.</i> Гамильтониан двухуровневого атома и квантованной моды поля, взаимодействующих в дипольном резонансном приближении. "Одетые" состояния и их энергии. Исследование эволюции при изначальном когерентном состоянии моды. Коллапс и восстановление рабиевских осцилляций. Объяснения феномена и оценка соответствующих времён. Упрощение модели при большом числе фотонов с узким их распределением (например, распределением Пуассона). Спонтанные переходы между одетыми состояниями. Триплет Раутиана-Моллоу.</p>	2	7	
<p><i>Статистика резонансной флуоресценции двухуровневого атома.</i> Включение показаний счётчиков в статистический оператор атома. Расширенное кинетическое уравнение. Его общее решение. статистика для центрального и боковых компонент триплета. Асимптотики квадрата дисперсии при большом времени.</p>	2	7	
<p>Промежуточная аттестация</p>	2 (конс.)	4	2 (зачёт)
<p><b>Раздел 5. Сжатые состояния</b></p>			
<p><i>Одномодовый случай.</i> Модель параметрического процесса преобразования частоты в нелинейной среде. Сжатый одномодовый вакуум. Квадратуры гармонической моды. Доказательство неклассического характера новых состояний -</p>	4	11	реферат



существования областей в $\alpha$ -плоскости с отрицательными значениями R-функции. Обоснование термина "сжатие". Периодическое изменение флуктуаций поля в сжатом состоянии. Схема регистрации сжатых состояний при балансном гомодинном детектировании. Схема повышения точности измерения фазовых сдвигов с помощью сжатых состояний в интерферометре Маха-Цандера			
<i>Состояния поляризованного света в квантовой оптике и их связь с двухмодовыми сжатыми состояниями.</i> Поляризация классической плоской световой волны. Поляризационная матрица. Параметры Стокса. Сфера Пуанкаре. Стохастичность поляризации. Классическое неравенство, связывающее дисперсию интенсивности с дисперсиями параметров Стокса. Поляризация квантовой волны. Поляризационный спин и схема измерения его компонент. Поляризация света, скрытая в шумах. Двухфотонный свет. Скалярные бифотоны.	4	13	
<b>Раздел 6. Физика оптических квантовых усилителей и аттенюаторов</b>			
Линейные квантовооптические устройства с единой точки зрения. Квантовая оптика светоделителя. Действие аттенюатора на когерентное состояние. Шумы усилителя. Усиление, чувствительное и нечувствительное к фазе. Фазовое сопряжение	2	9	
<b>Раздел 7. Обработка информации в квантовой оптике</b>			
<i>Идея квантового компьютера.</i> Кубиты, регистры. Вычислительный базис регистра. Элемент Адамара. Элемент C-NOT. Элемент Тоффли. Достаточность двухкубитовых элементов. Универсальный набор логических элементов. Квантовый параллелизм. Реализация элемента C-NOT в линейной оптике.	4	7	
<i>Основные квантовые алгоритмы.</i> Понятие квантового оракула. Алгоритм Дойча-Йожи. Алгоритм Бернштейна-Вазирани. Алгоритм Саймона (поиск двоичного периода функции). Алгоритм Гровера – поиск в неупорядоченной базе данных. Система кодирования RSA (кодирование с «открытым ключом»). Её взлом с помощью алгоритма Шора. Квантовое преобразование Фурье.	6	20	реферат
<i>Квантовые изображения.</i> Получение изображений с использованием коррелированных фотонов. Квантовая голография. Квантовая эллипсометрия. Оптика пучков с орбитальным	4	20	

угловым моментом. Зацепленность в таких пучках.			
<b>Раздел 8. Слабые измерения</b>			
Квантовая оптика в условиях пре- и пост-селекции состояний. Правило АВЛ для вероятностей. Пример с «тремя коробками». Общая схема измерения посредством квантованного измерителя при разных уровнях точности. Понятие «слабого измерения» и «слабого значения». Анализ слабого измерения в схеме «трёх коробок». Феномен «чеширского кота». Регистрация оптического эффекта Холла с помощью «слабого измерения».	4	15	
<b>Раздел 9. Фаза в квантовой оптике</b>			
«Наивный» подход Дирака и его недостатки. Подход Пегга и Барнета. Подход Сускинда и Глоговера. Подход М. Бана. Супероператор фазы. Интерференция света от независимых источников.	4	11	
<b>Раздел 9. Геометрическая (топологическая) фаза в оптике</b>			
Фаза Берри в квантовой физике. Простейший пример геометрической фазы когерентных состояний при эволюции их параметра в комплексной плоскости. Фаза Рытова-Владимирского в поляризационной оптике.	4	11	
Итоговая аттестация	2 (конс.)	6	4 (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. Компьютерные демонстрации коллапса и возобновления рабиевских нутаций в модели Джейнса-Каммингса, лабораторные демонстрации квантово-оптических

устройств – элементов институтской установки по исследованию атомарного бозе-эйнштейновского конденсата, обязательное участие в заседаниях еженедельного семинара Учебно-научного центра «Квантовая оптика».

### **Вопросы для самостоятельного изучения:**

#### **Раздел 1. Элементы классической стохастической оптики**

1. Изучить подход Пэйджа-Лампарда к понятию нестационарного спектра и сравнить его с подходом Винера-Хинчина.
2. Изучить подход Эберли и Водкевича к понятию нестационарного спектра и сравнить его с подходами Винера-Хинчина и Пэйджа-Лампарда.

#### **Раздел 2. Квантованное поле в оптике.**

1. Изучит определения W-распределения Вигнера и Q-распределения Хушими и их связь с P-распределением Глаубера. Найти эти распределения для когерентного состояния и равновесного одномодового состояния.
2. Изучить явление интерференции Хонга-Оу-Мандела.

#### **Раздел 3. Диссипация и необратимость в квантовой оптике.**

1. Найти выражение для стационарного состояния моды в диссипативном резонаторе при внешнем классическом источнике в виде монохроматически колеблющегося диполя.
2. Изучить понятие полной положительности преобразований и его важность в консервативной и (особенно) диссипативной квантовой физике и оптике.

#### **Раздел 4. Двухуровневый атом в квантованном поле**

1. Изучить модификацию резонансной флуоресценции двухуровневого атома при взаимодействии с полем, находящемся в состоянии Юрке-Столера, восстанавливаемом действием цепи обратной связи.
2. Самостоятельно изучить модель Тависа-Каммингса.

#### **Раздел 5. Сжатые состояния**

1. Найти стационарное состояние квантованной моды поля при совместном действии двухфотонного источника и ухода фотонов из резонатора.
2. Рассчитать отношение «сигнал-шум» при интерферометрическом измерении фазового сдвига в случае использования когерентного состояния и в случае использования сжатого состояния.
3. Изучить пути использования сжатых состояний в квантовых линиях связи.

#### **Раздел 6. Физика оптических квантовых усилителей и аттенюаторов**

1. Рассчитать спектр координаты и спектр импульса квантового затухающего осциллятора.
2. Рассмотреть перспективы использования модели осциллятора Бейтмана в квантовой оптомеханике.

## **Раздел 7. Обработка информации в квантовой оптике**

1. Изучить способ реализации операции C-NOT путём возбуждения ридберговских состояний в атомарных кубитах на основе сверхтонких подуровней основного состояния.
2. Рассчитать дисперсии параметров Стокса в квантовой эллипсометрии.

## **Раздел 8. Слабые измерения**

1. Вычислить «слабое значение» наблюдаемой импульса для состояний  $\Psi_1(x) = (1/\pi\Delta)^{1/4} \exp[-x^2/\Delta]$  и  $\Psi_2(x) = (1/\pi\Delta)^{1/4} \exp[-(x-a)^2/\Delta]$ .
2. Рассчитать зависимость от угла падения оптического эффекта Холла.

## **Раздел 9. Геометрическая (топологическая) фаза в оптике**

1. Изучить проявление фазы Рытова-Владимирского в волоконной оптике.
2. Рассмотреть проявления топологической фазы квантованной моды поля, адиабатически подчинённой медленной оптомеханической системе при циклической эволюции параметров гамильтониана (положение равновесия и коэффициент упругости) последней.

## **8 Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины**

### **Основная литература:**

1. Степанова В.А. Физика. Волновая и квантовая оптика. МИСИС, 2012
2. Пупков К.А., Егупов Н.Д., Макаренков А.М., Трофимов А.И. Теория и компьютерные методы исследования стохастических систем. Физматлит, 2003
3. Хренников А.Ю. Введение в квантовую теорию информации Физматлит, 2008
4. Колобов М.И. Под ред. Колобова М.И.; Перевод с англ. Голубевой Т.Ю.; Чиркина А.С. Квантовое изображение. Физматлит, 2009
5. Савельев И.В. Курс общей физики. В 3-х тт. Т.3. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Лань, 2011.

### **Дополнительная литература:**

1. Кадомцев Б.Б. Динамика и информация. Редакция журнала «Успехи физических наук», Москва, 1997.
2. Аллен Л., Эберли Дж. Оптический резонанс и двухуровневые атомы. М.: Мир, 1978.
3. Д. Бауместер, А. Экерт, А. Цайлингер Физика квантовой информации. М.; Постмаркет, 2002.
4. Менский М.Б. Квантовые измерения и декогеренция. М.: Физматлит, 2001

### **Методическая литература:**

1. Муромцева А.В. Искусство презентации. Основные правила и практические рекомендации «Флинта» 2011

### **Научные статьи:**

1. Карасёв В.П., Масалов А.В. *Состояния неполяризованного света в квантовой оптике.* Опт. и спектр., т.74, вып.5, 1993, с.928-936.
2. Белинский А.В., Клышко Д.Н. *Интерференция света и теорема Белла.* УФН, т.163, №8, 1993, с.1-45.
3. Белинский А.В. *Обобщённая теорема Белла.* ЖЭТФ, т.105, вып.4, 1994, с.818-827.
4. Ekert A. *Quantum cryptography based on Bell's theorem.* Phys. Rev. Lett., v.67, №6, 1991, p.661-663.
5. Hardy L. *Quantum mechanics, local realistic theories and Lorentz-invariant realistic theories.*

### **Интернет-ресурсы:**

1. Электронный справочник по "Оптике когерентного излучения" (с разделом "4.2.

Цифровая голография") <http://optics.sinp.msu.ru/co/toc.html>

2. 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](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/](http://ihtik.lib.ru/2011.08_ihtik_nauka-tehnika/)

### **Программное обеспечение:**

OS MS Windows, MS Office 2007, Adobe Reader

### **10 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.

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

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

Формами текущего контроля работы аспирантов по дисциплине «Продвинутый курс квантовой оптики» являются: зачет по вопросам к самостоятельной работе, реферат.

#### **Порядок осуществления текущего контроля**

Текущий контроль выполнения заданий осуществляется регулярно, начиная с 3 недели учебного года. 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 проводится в форме зачета (в конце первого полугодия).

#### **Вопросы к экзамену.**

1. Эксперимент Брауна-Твисса (интерференция интенсивностей).
2. Вывод Р-представления для матрицы плотности полевой моды.
3. Глауберовская теория фототсчетов на примере двухатомного детектора.
4. Уравнение эволюции открытой квантовой системы (пример с модой поля и пролётом резонансных атомов через её область).
5. Одетые состояния 2-уровневого атома.
6. Модель Джейнса-Каммингса.
7. Переход от операторного кинетического уравнения для полевой моды к уравнению

типа Фоккера-Планка

8. Детектирование сжатых состояний.
9. Определение и основные свойства когерентных состояний.
10. Аналитический сигнал в классической оптике.
11. Связь параметра группировки фотоотсчетов с дисперсией числа квантов. Примеры группировки и антигруппировки.
12. Определение и основные свойства сжатого состояния.
13. Теорема Винера-Хинчина.
14. Когерентность 1-го порядка, опыт Юнга.
15. Генерация сжатых состояний.
16. Суб- и суперпуассоновская статистика фототсчетов для одномодового поля.
17. Одномодовая лазерная генерация (уравнение и его основные свойства).
18. Аналитический сигнал в квантовой оптике.
19. Появление пространственной когерентности вдали от некогерентного источника
20. Параметры Стокса классической световой волны. Сфера Пуанкаре.
21. Соотношение дисперсии интенсивности и дисперсий параметров Стокса классической световой волны (вывод неравенства)
22. Схема измерения параметров Стокса
23. Параметры Стокса квантованной световой волны (соотношения коммутации, аналогия с квантовым угловым моментом)
24. Квантовое состояние с нулевой дисперсией для всех параметров Стокса – скалярный бифотон (аналогия с синглетным состоянием)
25. Алгоритм Гровера
26. Алгоритм Бернштейна-Вазирани
27. Реализация элемента C-NOT методами линейной оптики
28. Основы квантовых вычислительных схем: кубит, n-кубитовый регистр, элемент Адамара, C-NOT, элемент Тоффоли, контролируемое изменение фазы и его связь с C-NOT, квантовый параллелизм, квантовый оракул.
29. Алгоритм Дойча-Йожи
30. Алгоритм Саймона.
31. Универсальный набор элементов в квантовой компьютерике.
32. Явление коллапса и восстановления рабиевских нутаций.
33. Квантовое преобразование Фурье и схема его реализации
34. Идея алгоритма Шора (основные моменты)

### Задачи к экзамену

**Задача** о приведении к нормальному порядку (когда операторы рождения фотонов стоят левее операторов уничтожения) любой функции  $F(\hat{n})$  от оператора числа фотонов  $\hat{n} = \hat{a}^\dagger \hat{a}$ . Таким образом, требуется найти коэффициенты  $F_k$  в разложении

$$F(\hat{n}) = \sum_{k=0}^{\infty} F_k \hat{a}^{\dagger k} \hat{a}^k.$$

Подсказка: поскольку

$$F(n) = \int_0^{2\pi} \tilde{F}(\varphi) \exp(i\varphi n) \frac{d\varphi}{2\pi},$$

где

$$\tilde{F}(\varphi) = \sum_{n=0}^{\infty} F(n) \exp(-i\varphi n),$$

мы имеем

$$F(\hat{n}) = \int_0^{2\pi} \tilde{F}(\varphi) \exp(i\varphi \hat{n}) \frac{d\varphi}{2\pi}.$$

Поэтому достаточно найти нормальный порядок экспоненциальной функции  $\exp(i\varphi \hat{n})$ .

**Задача** о квантовом осцилляторе Вигнера (неканоническое квантование). Найти общий вид соотношения коммутации операторов  $\hat{a}$  и  $\hat{a}^\dagger$ , если известно, что

$$[\hat{a}, \hat{a}\hat{a}^\dagger + \hat{a}^\dagger\hat{a}] = 2\hat{a}.$$

Подсказка: выразить коммутатор  $[\hat{a}, \hat{a}^\dagger]$  через минимальное собственное значение оператора  $\hat{a}\hat{a}^\dagger + \hat{a}^\dagger\hat{a}$ .

**Задача** о приведении к "осцилляторному" виду гамильтониана

$$\hat{H} = \omega_1 \hat{a}_1^\dagger \hat{a}_1 + \omega_2 \hat{a}_2^\dagger \hat{a}_2 + \mu \hat{a}_1^\dagger \hat{a}_2 + \mu^* \hat{a}_2^\dagger \hat{a}_1.$$

Преобразовать этот гамильтониан к виду

$$\hat{H} = \Omega_1 \hat{b}_1^\dagger \hat{b}_1 + \Omega_2 \hat{b}_2^\dagger \hat{b}_2$$

с операторами  $\hat{b}_i$  и  $\hat{b}_i^\dagger$  ( $i = 1, 2$ ), удовлетворяющими бозевским коммутационным соотношениям. Найти их связь со старыми операторами и вычислит новые частоты  $\Omega_i$ .

**Задача.** Найти рекуррентное соотношение на амплитуды  $f_n$  в разложении состояния  $|\mathcal{E}\rangle$  по базису Фока:

$$|\mathcal{E}\rangle = \sum_{n=0}^{\infty} f_n |n\rangle,$$

являющегося собственным для оператора  $\hat{a}e^{-i\varphi} + \hat{a}^\dagger e^{i\varphi}$ :

$$(\hat{a}e^{-i\varphi} + \hat{a}^\dagger e^{i\varphi})|\mathcal{E}\rangle = \mathcal{E}|\mathcal{E}\rangle.$$



**Задачи** об определении условий на параметры квантового состояния при условии возбуждения одной моды когерентности.

Дано состояние

$$\hat{\rho} \propto \exp\left(\sum_{i,j=1,2} \alpha_{ij} \hat{a}_i^\dagger \hat{a}_j\right).$$

Известно, что это состояние одномодовое. Каковы условия, налагаемые этим фактом на коэффициенты  $\alpha_{ij}$ ?

Дано состояние

$$|\Psi\rangle \propto |\alpha_1\rangle \otimes |\beta_1\rangle + |\alpha_2\rangle \otimes |\beta_2\rangle.$$

Известно, что это состояние одномодовое. Каковы условия, налагаемые этим фактом на  $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1$  и  $\beta_2$ ?

**Задача** о геометрической фазе когерентных состояний. Решить уравнение

$$\frac{d}{dt} |\psi(t)\rangle = -i\left(\omega_0 \hat{a}^\dagger \hat{a} + \lambda(t) \hat{a}^\dagger + \lambda^*(t) \hat{a}\right) |\psi(t)\rangle,$$

Проанализировать циклическую эволюцию, когда  $\lambda(0) = \lambda(T)$ . Найти геометрическую интерпретацию фазы, приобретаемой состоянием в результате такой эволюции.

**Задача** Представить собственные состояния оператора

$$\hat{b} = \exp(i2\pi \hat{a}^\dagger \hat{a}/3) \hat{a}$$

в виде суперпозиций когерентных состояний оператора  $\hat{a}$

Подсказка: использовать для построения суперпозиции три состояния  $|\alpha_1\rangle, |\alpha_2\rangle, |\alpha_3\rangle$  с одинаковым модулем параметров  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ , но разными фазами.

**Задача** вывода квантовой формулы Манделя. Модифицировать кинетическое уравнение для статистического оператора квантованной моды

$$\frac{d}{dt} \hat{\rho} = \gamma \hat{a} \hat{\rho} \hat{a}^\dagger - \frac{\gamma}{2} \{\hat{a}^\dagger \hat{a}, \hat{\rho}\},$$

описывающее необратимую гибель фотонов, с включением в рассмотрение показание счётчика поглощённых квантов. Ввести множество операторов  $\hat{\rho}^{(k)}$ , где  $k$ -показание счётчика; при этом

$$\hat{\rho} = \sum_{k=0}^{\infty} \hat{\rho}^{(k)}$$

а

$$p(k) = \text{Tr} \hat{\rho}^{(k)}$$

– вероятность данного показания счётчика. Решить уравнение для  $\hat{\rho}^{(k)}$  и найти  $p(k)$  и вывести квантовый вариант формулы Манделя.

**Задача** о приведении к "осцилляторному" виду гамильтониана с парным рождением и уничтожением квантов

$$\hat{H} = \omega \hat{a}^\dagger \hat{a} + \mu \hat{a}^\dagger \hat{a}^\dagger + \mu^* \hat{a} \hat{a}.$$

**Задача** о нахождении решения кинетического уравнения с взаимодействием квантованной моды с классическим диполем (в общем случае осциллирующем не на частоте моды) и с необратимым поглощением фотонов *при больших временах*:

$$\frac{d}{dt} \hat{\rho} = -i[\omega_0 \hat{a}^\dagger \hat{a} + \lambda e^{-i\omega t} \hat{a}^\dagger + \lambda^* e^{i\omega t} \hat{a}, \hat{\rho}] + \gamma \hat{a} \hat{\rho} \hat{a}^\dagger - \frac{\gamma}{2} \{\hat{a}^\dagger \hat{a}, \hat{\rho}\}.$$

Предварительно произвести преобразование, устраняющее явную зависимость от времени правой части уравнения.

**Задача.** Вычислить топологическую фазу, приобретаемую квантованной модой в когерентном состоянии  $|\alpha\rangle$  при эволюции по ломаному пути  $(0,0) \rightarrow (1,0.5i) \rightarrow (1,-0.5i) \rightarrow (0,i) \rightarrow (0,0)$  в комплексной плоскости  $\alpha$ .

**Задача.** Построить состояние двух мод с пуассоновским распределением для каждой из мод и с определённой разностью фаз между модами.

**Задача.** Построить состояние двух мод с заданным суммарным числом фотонов и с определённой разностью фаз между модами.

**Задача.** Для состояния двух мод в когерентных состояниях со случайными фазами и заданной разностью фаз рассчитать средние значения фазовой экспоненты в подходах Пегга-Барнета, Сускинда-Глоговера и М. Бана.

### Темы рефератов.

1. Квантовая оптомеханика: применения и перспективы.
2. Экспериментальные наблюдения интерференции фотонов от независимых источников.
3. Возникновение когерентности в процессе детектирования.
4. Делители пучков в квантовой оптике: нетривиальные физические свойства.
5. Обратная связь в квантовой оптике: достижения и перспективы.
6. Методы приготовления коррелированных фотонных состояний.
7. Система кодирования RSA (с необходимыми элементами теории чисел).
8. Новейшие квантовые алгоритмы.
9. Идея топологических квантовых вычислений.
10. Последние достижения физики пучков с ОАМ.
11. Интерферометрия Рамси: достижения и перспективы.
12. Интерференционная схема Франсона: идея и применения.

13. Идея SIC-измерений и их варианты в квантовой оптике.

14. Квантовая метрология с использованием зацепленности.

### Критерии оценивания

<i><b>Зачтено</b></i>	<i><b>Не зачтено</b></i>
<p>Успешное и системное владение навыками:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- расчёты квантовых оптических систем на основе аппарата когерентных состояний;</li><li>- преобразовывать друг в друга распределения Глаубера, Вигнера и Хушими для оптических квантовых состояний.</li></ul> <p>Сформированные и системные умения применять:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- проводить экспериментальные исследования с использованием волоконно-оптических систем, аналоговых и цифровых систем записи и обработки сигналов и изображений</li></ul> <p>Сформированные и системные знания:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• понятие квантового кинетического уравнения для моды поля, его выводом и решением;</li><li>• понятие сжатого состояния, схема его получения, обнаружения и применения;</li><li>• содержание основных алгоритмов квантовых вычислений;</li><li>• основные идеи получения квантовых изображений на основе коррелированных фотонных пар;</li><li>• понятие фазы в квантовой оптике и понимание причин многообразия подходов к этой проблеме;</li><li>- понятием топологической фазы, и её основными типами в оптике.</li></ul> <p>Отметка «зачтено» ставится аспиранту, выполнившему в полном объеме все текущие задания или допустившие минимальные неточности при ответе на вопросы, сумевшему обосновать ответы в соответствии с приведенными критериями оценивания результатов обучения.</p>	<p>Фрагментарное владение навыками:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- расчёты квантовых оптических систем на основе аппарата когерентных состояний;</li><li>- преобразовывать друг в друга распределения Глаубера, Вигнера и Хушими для оптических квантовых состояний.</li></ul> <p>Фрагментарные умения:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- проводить экспериментальные исследования с использованием волоконно-оптических систем, аналоговых и цифровых систем записи и обработки сигналов и изображений;</li></ul> <p>Фрагментарные знания:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• понятие квантового кинетического уравнения для моды поля, его выводом и решением;</li><li>• понятие сжатого состояния, схема его получения, обнаружения и применения;</li><li>• содержание основных алгоритмов квантовых вычислений;</li><li>• основные идеи получения квантовых изображений на основе коррелированных фотонных пар;</li><li>• понятие фазы в квантовой оптике и понимание причин многообразия подходов к этой проблеме;</li><li>- понятием топологической фазы, и её основными типами в оптике.</li></ul> <p>Отметка «не зачтено» ставится аспиранту, не выполнившему в полном объеме все текущие задания или допустившие существенные неточности при ответе на вопросы, не сумевшие обосновать ответы в соответствии с приведенными критериями оценивания результатов обучения.</p>