

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Владимирский государственный университет  
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»  
(ВлГУ)



УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор, проректор по  
научной и инновационной работе  
В.Г. Прокошев

« 5 » 06 2015 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ**

**КВАНТОВАЯ ОПТИКА**  
(наименование дисциплины)

Направление подготовки 03.06.01 Физика и астрономия

Направленность (профиль) подготовки Лазерная физика

Уровень высшего образования Подготовка кадров высшей квалификации

Квалификация выпускника Исследователь. Преподаватель-исследователь

Форма обучения очная

Курс	Трудоем- кость зач. ед, час.	Лек- ции, час.	Практич. занятия, час.	Лаборат. работы, час.	СРА, час.	Форма промежуточного контроля (экз./зачет)
2	3/108	36			72	зачет
Итого	3/108	36			72	зачет

г. Владимир, 2015 г.

## **1. ЦЕЛИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ**

Целями освоения дисциплины (модуля) «Квантовая оптика» формирование у аспирантов знаний и компетенций в области лазерной физики, квантовой и атомной оптики, оставшихся за рамками образовательной программы высшего профессионального образования, в условиях высокой степени изменчивости рыночной среды, способствование формированию будущих научно-педагогических кадров в области лазерной физики, необходимого для успешной работы в рыночных условиях современной России.

Задачи курса сформировать у аспирантов теоретические и практические знания, навыки и компетенции при решении современных проблем лазерной физики, в частности:

– путем применения основных понятий, концепций и моделей современной лазерной науки;

– за счет использования в теории и на практике современных подходов и тенденций в микро- и макромире.

Основной задачей дисциплины также является изучение когерентных и кооперативных квантово-оптических эффектов.

## **2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОПОП ВО**

Данная дисциплина относится к дисциплинам по выбору вариативной части ОПОП подготовки аспирантов по направленности «Лазерная физика». Знания, формируемые курсом необходимы как в исследовательской работе, так и для инженерных разработок для направлений лазерной техники. Изложение материала в рамках курса учитывает, как базовые положения лазерной физики, так и современные тенденции данной области науки.

В настоящее время область использования квантовой оптики в качестве научного и технологического инструмента постоянно расширяется. Курс «Квантовая оптика» дает основу для последующей работы специалиста в области лазерной физики, систематизировано представляя принципы и примеры применения лазерного излучения.

## **3. КОМПЕТЕНЦИИ ОБУЧАЮЩЕГОСЯ, ФОРМИРУЕМЫЕ В РЕЗУЛЬТАТЕ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ**

В результате освоения программы аспирантуры у выпускника должны быть сформированы следующие компетенции:

**УК-1** способностью к критическому анализу и оценке современных научных достижений, генерированию новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях;

**УК-5** способностью планировать и решать задачи собственного профессионального и личностного развития;

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

**ПК-2** способность анализировать и разрабатывать новые методы и физические принципы генерации и преобразования когерентного оптического излучения;

**ПК-4** готовность применять современные математические методы при анализе процессов лазерной физики, квантовой оптики, фотоники и лазерных нанотехнологий;

**ПК-5** готовностью использовать современные методы лазерной физики и лазерных технологий в различных областях науки и техники, включая высокоточные оптические измерения, модификацию и обработку материалов, локацию, лазерную медицину и др.

В результате освоения дисциплины обучающийся должен демонстрировать следующие результаты образования:

**Знать:** математические модели для решения физических задач (ПК-4, ПК-5); основные подходы к численному решению физических задач (УК-1); современные методы исследования и информационно-коммуникационные технологии (ОПК-1); новые методы и физические принципы генерации и преобразования когерентного оптического излучения (ПК-2); современные методы и технологии научной коммуникации на государственном и иностранном языках (УК-5);

**Уметь:** работать с информацией из различных источников, включая сетевые ресурсы сети Интернет, для решения профессиональных и социальных задач (ОПК-1); критически переосмысливать накопленный опыт, изменять при необходимости вид и характер своей профессиональной деятельности (УК-1); собирать, обрабатывать и интерпретировать данные современных научных исследований, необходимые для формирования выводов по соответствующим научным, профессиональным, социальным и этическим проблемам (ПК-5, ПК-2, ОПК-1); планировать и решать задачи собственного профессионального и личностного развития (УК-5); самостоятельно осуществлять научно-исследовательскую деятельность в соответствующей профессиональной области с использованием современных методов исследования и информационно-коммуникационных технологий (ОПК-1);

**Владеть:** способностью строить математические модели объектов исследования и выбирать численный метод их моделирования, разрабатывать новый или выбирать готовый алгоритм решения задачи; способностью к интеллектуальному, культурному, нравственному, физическому и профессиональному саморазвитию, повышению своей квалификации и мастерства (ПК-2, ОПК-1); способностью приобретать новые научные и профессиональные знания, используя современные образовательные и информационные технологии; способностью составлять и контролировать план выполняемой работы, планировать необходимые для выполнения работы ресурсы, оценивать результаты собственной работы (ПК-5, ПК-4); способностью планировать и решать задачи собственного профессионального и личностного развития (УК-5); способностью 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, ПК-5).

#### 4. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Общая трудоемкость дисциплины составляет 3 зачетные единицы, **108** часов.

№ п/п	Раздел (тема) дисциплины	Год обучения	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу аспирантов и трудоемкость (в часах)					Формы текущего контроля успеваемости (по неделям семестра), форма промежуточной аттестации (по семестрам)
			Лекции	Семинары	Практические занятия	Лабораторные работы	СРА	
1.	Квантовые (фотонные) аспекты нелинейной оптики	2	12				24	тестирование
2.	Когерентность в квантовой оптике	2	12				24	тестирование
3.	Статистические свойства световых полей	2	12				24	тестирование
<b>ИТОГО:</b>		<b>2</b>	<b>36</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>72</b>	<b>зачет</b>

## СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

### 1. Основное содержание курса.

#### 1.1. Введение.

Основные проблемы и направления в современной оптике. Классическая электромагнитная теория света. Классификация электромагнитных волн. Шкала электромагнитных волн. Источники света, их характеристики. Ограниченность классической теории. Корпускулярно - волновой дуализм.

#### 1.2. Основы электромагнитной теории света.

Уравнения Максвелла. Волновое уравнение. Бегущие электромагнитные волны. Скорость света в однородных изотропных диэлектриках. Плотность энергии и импульса электромагнитных волн. Вектор Умова-Пойнтинга. Интенсивность света. Давление света. Опыты Лебедева.

#### 1.3. Модулированные волны.

Модели оптического излучения. Волновые пучки и волновые пакеты. Монохроматические и квазимонохроматические волны, широкополосное излучение. Фурье-анализ и Фурье-синтез волновых полей. Спектральная плотность мощности. Соотношение между длительностью импульса и шириной спектра.

#### 1.4. Явление интерференции.

Интерференция монохроматических волн. Интерференция квазимонохроматического света. Функция видности. Основные интерференционные схемы. Получение интерференционных картин делением волнового фронта (метод Юнга) и делением амплитуды (метод Френеля). Полосы равной толщины и равного наклона. Интерферометр Майкельсона.

#### 1.5. Основные понятия квантовой оптики

Аналитический сигнал и флуктуации интенсивности. Корреляционные функции. Радиус и длина когерентности. Интерферометры Майкельсона и Юнга. Интерференция интенсивности и эффект Брауна-Твисса. Фактор вырождения. Эффекты группировки и антигруппировки фотонов. Статистика фотоотсчетов. Полуклассическая формула Манделя. Роль объема детектирования. Распределение чисел фотонов в тепловом и лазерном излучении в случаях одной и многих мод. Эффекты группировки фотонов. Корреляция фотонов.

#### 1.6. Квантование поля

Уравнение Максвелла в  $(kt)$ -представлении. Канонические переменные поля. Гамильтониан поля и зарядов. Дипольное приближение. Скобки Пуассона и коммутаторы. Симметризация. Нормально-упорядоченные операторы. Формула Бейкера-Хаусдорфа. Квантование поля в диэлектрике и в резонаторе. Динамика поля в представлениях Шредингера, Гейзенберга, Дирака. Обозначения Дирака. Разложение операторной единицы.

#### 1.7. Классические модели излучения света.

Классическая модель затухающего дипольного осциллятора. Оценка времени затухания. Лоренцева форма и ширина линии излучения. Естественная ширина линии излучения. Излучение ансамбля статистически независимых осцилляторов. Ударное (столкновительное) и доплеровское уширение спектральной линии. Понятие об однородном и неоднородном уширении.

#### 1.8. Когерентность волн.

Временная когерентность, время и длина когерентности; спектральное и временное рассмотрение. Взаимосвязь спектра и корреляционной функции. Понятие о Фурье-

спектроскопии. Пространственная когерентность. Интерферометр Юнга. Звездный интерферометр Майкельсона. Радиус и степень пространственной когерентности, их оценка для полей тепловых источников и лазеров. Методы повышения степени когерентности. Пространственные фильтры.

### **1.9. Многолучевая интерференция.**

Суперпозиция многих волн с равными амплитудами. Интерферометр Фабри-Перо. Формула Эйри. Пластика Люммера-Герке. Стоячие световые волны. Опыты Винера. Применение интерферометров в науке и технике: измерение малых смещений, рефрактометрия. Интерференционные фильтры и зеркала.

### **1.10. Явление дифракции.**

Принцип Гюйгенса-Френеля, его интегральная запись и трактовка. Зоны Френеля. Применение векторных диаграмм для анализа дифракционных картин. Зонные пластинки. Дифракция на круглом отверстии и экране. Принцип Бабиня. Ближняя и дальняя зоны дифракции. Дифракционная длина. Дифракция на краю полубесконечного экрана. Спираль Корню.

### **1.11. Понятие о теории дифракции Кирхгофа.**

Приближение Френеля и приближение Фраунгофера. Пространственное преобразование Фурье. Дифракционная картина в дальней зоне как Фурье-образ дифракционного объекта. Угловой спектр, связь его ширины с размерами отверстия. Дифракция Фраунгофера на щели, на прямоугольном и круглом отверстиях. Амплитудные и фазовые дифракционные решетки. Дифракция на акустических волнах. Акустооптические модуляторы.

### **1.12. Дифракция и спектральный анализ.**

Спектральный анализ в оптике. Спектроскопия с пространственным разложением спектров. Призмные, дифракционные и интерференционные спектральные приборы и их основные характеристики: аппаратная функция, угловая и линейная дисперсия, разрешающая способность, область дисперсии.

### **1.13. Дифракция волновых пучков.**

Дифракционная теория формирования изображений. Роль дифракции в приборах формирующих изображение: линзе, телескопе, микроскопе. Специальные методы наблюдения фазовых объектов: метод фазового контраста, метод темного поля.

### **1.14. Основные типы состояний поля**

Энергетические состояния для одной и многих мод. Зависимость от времени. Когерентные состояния. Связь с энергетическим базисом. Оператор смещения. Координатные и импульсные состояния. Связь с другими базисами. Смешанные состояния. Матрица плотности в энергетическом представлении. Когерентное Р-представление. Функция Вигнера. Характеристическая функция. Статистика хаотического поля. Признаки неклассичности световых полей.

### **1.15. Основные представления о квантовой теории излучения света атомами и молекулами.**

Модель двухуровневой системы. Взаимодействие двухуровневой системы с излучением: спонтанные и вынужденные переходы. Коэффициенты Эйнштейна. Многоуровневые системы. Явление люминесценции: основные закономерности, спектральные и временные характеристики, интерпретация в рамках квантовых представлений. Резонансное усиление света при инверсной заселенности энергетических

уровней. Методы создания инверсной заселенности в различных средах. Факторы определяющие ширину линии усиления.

#### **1.16. Статистика фотонов и фотоэлектронов.**

Статистика фотоотсчетов. Формула Мандела. Факториальные моменты. Производящая функция. Распределения Пуассона и Бозе-Эйнштейна. Формула Эйнштейна для дисперсии числа фотонов. Группировка и антигруппировка фотонов. Фотонный шум и его подавление.

#### **1.17. Лазеры - устройство и принцип работы.**

Роль оптического резонатора. Условия стационарной генерации (баланс фаз и баланс амплитуд). Продольные и поперечные моды. Спектральный состав излучения лазеров. Синхронизация мод, генерация сверхкоротких импульсов. Энергетические характеристики лазерных систем.

**1.18. Нелинейные оптические явления.** Поляризация среды в поле высокоинтенсивного

лазерного излучения. Среда с квадратичной нелинейностью. Генерация гармоник, оптическое детектирование. Фазовый синхронизм и его реализация. Среда с кубической нелинейностью. Самофокусировка волновых пучков. Вынужденное комбинационное рассеяние света.

#### **1.19. Закон Кирхгофа для теплового излучения**

Кинетическое уравнение для среднего числа фотонов в моде. Закон Кирхгофа для одной поперечной моды: связь тепловых шумов и поглощения (усиления). Зависимость спектральной мощности шума от частоты, эффективной температуры, усиления. Шумы многомодового усилителя, оценка яркости и мощности сверхлюминесценции.

### **5. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ**

- лекционно-семинарская система обучения (традиционные лекционные и лабораторные занятия);
- применение мультимедиа технологий (проведение лекционных занятий с применением компьютерных презентаций и демонстрационных роликов с помощью проектора или ЭВМ);
- информационно-коммуникационные технологии (применение информационных технологий для мониторинга текущей успеваемости аспирантов и контроля знаний);
- встречи с учеными, работающими в области лазерной физики и лазерной диагностики.

### **6. ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ УСПЕВАЕМОСТИ, ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ПО ИТОГАМ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ И УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ АСПИРАНТОВ**

#### **а) Самостоятельная работа**

**Самостоятельная работа аспиранта** – это средство вовлечения аспиранта в самостоятельную познавательную деятельность, формирующую у него психологическую потребность в систематическом самообразовании.

Самостоятельная работа аспирантов во внеаудиторное время может предусматривать:

- проработку лекционного материала, работу с научно-технической литературой при изучении разделов лекционного курса, вынесенных на самостоятельную проработку;
- решение задач;

- подготовку к контрольным работам, коллоквиумам;
- выполнение индивидуальных заданий, предусмотренных учебным планом и т. д.

Самостоятельная работа аспирантов в аудиторное время весьма многообразна и может предусматривать:

- выполнение самостоятельных работ;
- выполнение контрольных работ, составление схем, диаграмм;
- решение задач;
- работу со справочной, методической и научной литературой;
- защиту выполненных работ;
- оперативный (текущий) опрос по отдельным темам изучаемой дисциплины;
- собеседование, коллоквиумы;
- тестирование и т.д.

В ходе самостоятельной работы должна осуществляться главная функция обучения – закрепление знаний, получение новых и превращение их в устойчивые умения и навыки. Постановка самостоятельной работы осуществляется лектором дисциплины и предполагает ее планирование, нормирование, организацию и контроль.

Видами заданий для самостоятельной работы могут быть:

**для овладения знаниями:**

- чтение текста (учебника, первоисточника, дополнительной литературы);
- составление плана текста; графическое изображение структуры текста;
- конспектирование текста; выписки из текста; работа со словарями и справочниками; ознакомление с нормативными документами;
- учебно-исследовательская работа; использование аудио- и видеозаписей, компьютерной техники и Интернета и др.;

**для закрепления и систематизации знаний:**

- работа с конспектом лекции (обработка текста); повторная работа над учебным материалом (учебника, первоисточника, дополнительной литературы, аудио- и видеозаписей);
- составление плана и тезисов ответа;
- составление таблиц для систематизации учебного материала;
- ответы на контрольные вопросы;
- аналитическая обработка текста (аннотирование, рецензирование, реферирование и др.);
- подготовка сообщений к выступлению на семинаре, конференции;
- подготовка рефератов, докладов;
- составление библиографии, тестирование и др.;

**для формирования умений:**

- решение задач и упражнений по образцу;
- решение вариативных задач и упражнений;
- выполнение расчетно-графических работ и др.

Виды заданий для самостоятельной работы, их содержание и характер могут иметь вариативный и дифференцированный характер, учитывать специфику специальности, изучаемой дисциплины, индивидуальные особенности аспирантов.

При изучении курса физики большое значение имеет практическое применение теоретических знаний при решении задач. Это способствует приобщению аспирантов к самостоятельной творческой работе, учит анализировать изучаемые явления, выделять

главные факторы. Зачастую аспиранты сталкиваются с определенными трудностями при решении задач по физике. Это объясняется тем, что для их решения, как правило, недостаточно формального знания физических законов. В некоторых случаях необходимо знание специальных приемов, общих для решения определенных групп задач. В других случаях таких методов не существует. Тогда главным, что способствует успеху, становится способность аналитического мышления.

Этим двум особенностям решения физических задач на практических занятиях преподавателями уделяется определенное внимание, однако хорошего результата, аспирант может добиться только с помощью самостоятельного решения разнообразных задач. Для стимуляции этого процесса аспирантам предлагаются индивидуальные задания.

### **Методические указания для написания реферата**

Реферат (от лат. *refereo* - докладываю, сообщаю) - краткое изложение в письменном виде или в форме публичного выступления содержания книги, научной работы, результатов изучения научной проблемы; доклад на определенную тему, включающий обзор соответствующих литературных и других источников. Как правило, реферат имеет научно-информационное назначение, это лишь краткое изложение чужих научных выводов. Этим реферат отличается от курсовой и дипломной работ, которые представляют собой собственное научное исследование.

Написание реферата (доклада) начинается с определения темы и подбора литературы. Наиболее распространенная проблема у первокурсников – неумение работать с библиотечными фондами. Поэтому вы должны в максимально сжатые сроки научиться самостоятельно подбирать литературу – это залог вашей успешной учебы. В каждой библиотеке, в зале каталогов, находится консультант, который всегда поможет вам сориентироваться в библиотечных фондах и правильно оформить заказ на книгу. Работая в библиотеке, учитывайте следующие факторы:

- если вам необходимо подобрать литературу по конкретной теме, но вы не знаете авторов книг (монографий), используйте предметный каталог;
- если вам известен автор или название книги, вы можете воспользоваться алфавитным каталогом;
- в каждой библиотеке дополнительно существует картотека журнальных статей;
- в настоящее время библиотеки предоставляют платные услуги для составления списка литературы по требуемой тематике, однако откажитесь от соблазна воспользоваться этим, пока не освоите методику поиска литературы самостоятельно;
- не забывайте про ресурсы интернета.

При работе над рефератами используйте журналы УФН, ЖЭТФ, Квантовая электроника, сайты естественно-научного цикла, поисковую систему Google и т. д.

Часто в рефератах встречается неправильное оформление списка литературы с библиографической точки зрения. Это замечание принципиально, так как научная жизнь имеет собственную культуру, приобщение к которой – одна из задач университетского образования. Иногда учащиеся оставляют недостаточно времени для написания работы. Хотя вопрос о сроках – индивидуальный, но качественная работа создается в течение недель и месяцев, а не дней или часов.

### **Примерные темы рефератов**

1 Применение интерференции в науке и технике (фильтры, зеркала, рефрактометры, измерение малых смещений, запись голограмм).



2. Роль дифракции в приборах, формирующих изображение: линзе, микроскопе, телескопе.

3. Фотоэлектрические приемники света (фотоэлементы, фотодиоды, электронно-оптические преобразователи, ФЭУ).

4. Явление люминесценции: основные закономерности, характеристики, интерпретация в рамках квантовых представлений.

5. Нелинейные процессы в средах с квадратичной нелинейностью

6. Нелинейные процессы в средах с кубичной нелинейностью

7. Параметрические процессы в оптике и корреляция фотонов

8. Генерация гармоник, оптическое детектирование. Фазовый синхронизм и его реализация.

9. Самофокусировка волновых пучков.

10. Нелинейно-оптические процессы в оптических волокнах и световодах.

11. Нелинейная оптика фотокристаллических волокон.

12. Вынужденное комбинационное рассеяние света.

13. Лазерный термоядерный синтез: состояние и проблемы.

14. Рубиновый лазер.

15. Nd: YAG – лазер.

16. Лазер на стекле с неодимом.

17. Гелий-неоновые лазеры.

18. Лазеры на парах меди и золота.

19. Аргонный лазер.

20. Экимерные лазеры.

21. Лазеры на красителях.

22. Полупроводниковые лазеры.

23. Лазеры на центрах окраски.

24. Рентгеновских лазеры.

25. Волоконные лазеры.

#### **б) Перечень вопросов для тестирования**

1. Линейно поляризованное излучение He-Ne лазера с шириной спектра 20 МГц направляется в интерферометр Маха-Цендера. В одном из плеч интерферометра стоит полуволновая пластинка, без потерь поворачивающая поляризацию на  $90^\circ$ . Какой должна быть разность плеч, чтобы на выходе интерферометра свет был неполяризован во втором порядке по полю?

2. Как с помощью кристалла ниобата лития сделать неполяризованным линейно поляризованное излучение светодиода с центральной длиной волны 500 нм и шириной спектра 30 нм? Какой длины нужно взять кристалл? Обыкновенный и необыкновенный показатели преломления на длине волны 500 нм равны, соответственно, 2,34 и 2,24.

3. В течение какого времени (по порядку величины) солнечный свет можно считать поляризованным?

4. То же, для светодиода, излучающего в диапазоне 30 нм с максимумом на 500 нм?

5. Какая корреляционная функция Глаубера измеряется в эксперименте по наблюдению «скрытой поляризации»? Записать выражение.

6. Недиагональные элементы матрицы когерентности равны нулю. Означает ли это, что свет неполяризован?

7. Можно ли по виду вектора Джонса определить, является ли свет полностью или частично поляризованным? Ответ обосновать.
8. Какова должна быть толщина кварцевой пластинки, ориентированной (оптической осью) под углом 45 градусов к вертикали, чтобы горизонтально поляризованное излучение титан-сапфирового лазера с длиной волны 800 нм и длительностью импульса 100 фс на выходе из пластинки становилось
- вертикально поляризованным;
  - неполяризованным. Двупреломление кварца считать равным 0.01.
9. Докажите, что матрицы вида  $\begin{pmatrix} t & r \\ -r^* & t^* \end{pmatrix}$ ,  $|t|^2 + |r|^2 = 1$  образуют группу по отношению к операции умножения.
10. Показать, что векторы Джонса для правоциркулярной и левоциркулярной поляризации ортогональны.
11. Сколькими вещественными параметрами характеризуется произвольный двухмодовый светоделитель? Фазовая пластинка? Ротатор? Ответ обосновать.
12. Как преобразуется вектор Джонса, когда вектор Стокса поворачивается на  $\pi$  вокруг оси  $\sigma_3$ ? Запишите матрицу Джонса.
13. Коммутативны ли поляризационные преобразования? Ответ обосновать.
14. Можно ли придумать набор фазовых пластинок или ротаторов, который любое поляризационное состояние преобразовывал бы в ортогональное?
15. (а) Как должен быть поляризован свет, чтобы произвольный ротатор не менял его состояния поляризации? (б) Каким должен быть ротатор, чтобы он не менял произвольного состояния поляризации света?
16. Как из пластинок  $\frac{\lambda}{2}$  и  $\frac{\lambda}{3}$  сделать пластинку  $\frac{\lambda}{6}$ ?
17. Имеются четвертьволновые пластинки для излучения YAG:Nd лазера с длиной волны 1064 нм. Будут ли две такие пластинки работать как одна полуволновая пластинка? Будет ли одна такая пластинка работать как полуволновая пластинка для излучения второй гармоники того же лазера?
18. Свет, поляризованный линейно по x, падает на систему из 5 пластин  $\lambda/2$ , причем оси всех четных пластин направлены под углом  $+1^\circ$  к оси x, а оси всех нечетных - под углом  $-1^\circ$  к ней. Как будет поляризован свет на выходе? А если все пластинки ориентированы одинаково - под углом  $+1^\circ$  к оси x?
19. Два ортогонально поляризованных монохроматических пучка света проходят через одинаковые фазовые пластинки, а затем сбиваются на экране. Будет ли наблюдаться интерференция? Ответ обосновать.
20. Найти степень поляризации для однофотонного состояния.
21. Как измерить параметр Стокса  $S_1$ ?
22. Нарисовать установку для измерения комбинации параметров Стокса  $S_1+S_2$ .
23. Вычислить коммутатор  $[S_1, S_2]$ .
24. Составляют ли группу операторы Стокса? Ответ обосновать.
25. Вычислить параметры Стокса для состояния  $|\text{vac}\rangle + c|2, 0\rangle$ , генерируемого при СПР первого типа. Какие параметры Стокса могут быть измерены одновременно для этого состояния?
26. Доказать соотношение  $S_0^2 = S_1^2 + S_2^2 + S_3^2$ .

27. Найти среднее значение оператора  $S^2 = (S, S)$  в однофотонном состоянии.

28. Найти коммутатор  $[S^2, S_1]$ .

29. Покажите, что признак неклассичности  $D_k(0) \equiv \frac{g_{k-1}g_{k+1}}{g_k^2} < 1$ ,  $g_k \equiv \frac{G_m^{(k)}}{G_m^{(1)k}}$ , не

выполняется для теплового (гауссовского) излучения.

30. Выполняется ли этот признак для когерентного излучения?

31. Найти объем когерентности для излучения диодного лазера-указки с длиной волны 650 нм, шириной спектра 10 нм, диаметром пучка 3 мм и дифракционной расходимостью. (Зачем здесь упоминается дифракционная расходимость?) При какой мощности лазерной указки в объеме когерентности будет один фотон?

32. Чему равна Р-функция для вакуума? А функция Вигнера?

33. Какие величины надо измерить в эксперименте, чтобы убедиться в неклассичности двухфотонного света? Нарисовать схему эксперимента.

34. Найти параметр группировки (нормированную КФ второго порядка)  $g^{(2)}$  для состояния  $\alpha|0\rangle + \beta|2\rangle$ ,  $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$ . При каком условии свет в таком состоянии будет обладать антигруппировкой?

35. Какого порядка должна быть нелинейность у среды, чтобы в ней возможна была генерация трехфотонного света? Запишите гамильтониан.

36. Какие физические величины измеряются при проверке неравенства Белла в форме Клаузера-Хорна-Шимони-Хольта?

37. Показать, что для света в белловском состоянии (хотя бы одном из четырех),

$$\Psi^\pm \equiv (a_1^\dagger b_2^\dagger \pm b_1^\dagger a_2^\dagger) |vac\rangle,$$

$$\Phi^\pm \equiv (a_1^\dagger a_2^\dagger \pm b_1^\dagger b_2^\dagger) |vac\rangle,$$

где  $a^\dagger, b^\dagger$  - операторы рождения в поляризационных модах x, y, а индексы 1, 2 обозначают пространственные моды, свет в каждой из пространственных мод полностью неполяризован (степень поляризации равна нулю).

38. При абсолютной калибровке фотодетекторов с помощью бифотонного поля (по методу Клышко) один из детекторов выбирается более широкополосным (как по углу, так и по частоте), чем другой. Какой из двух детекторов при этом калибруется?

39. Если бы у детей капитана Гранта был маятник Фуко с чрезвычайно малым затуханием, на какой угол бы отклонилась плоскость качаний после кругосветного путешествия по 37й параллели? Продолжительность путешествия - 365 дней.

40. На какой угол поворачивается плоскость качаний маятника Фуко в Санкт-Петербурге за сутки?

41. На какой угол поворачивается поляризация света при прохождении через 3 витка световода, закрученного в виде спирали с радиусом 5 см и шагом 1 см?

42. Свет, поляризованный линейно по X, преобразуется в состояние с линейной поляризацией под 45° а) ротатором, б) пластинкой  $\lambda/2$ . В каком случае будет больше набег геометрической фазы? Ответ обосновать.

43. То же, найти набег геометрической фазы.

44. Свет, поляризованный правоциркулярно, пропускают через пластинку  $\lambda/2$ , ориентированную оптической осью под углом  $\chi$  к вертикали, а затем через точно такую же

пластинку, ориентированную оптической осью под углом  $-\chi$  к вертикали. Найти изменение геометрической фазы.

44. Оцените чувствительность квантового магнетометра.
45. Как с помощью фазовой пластинки сделать 50% светоделитель для  $x$ - и  $y$ -поляризационных мод?
46. То же, для полуволновой и четвертьволновой пластинки. Для пластинки  $\lambda/3$ ?
47. Неполяризованное излучение, приготовленное из  $x$ -поляризованного излучения теплового источника (как?) пропускают через полуволновую пластинку, ориентированную под углом  $22.5^\circ$  к  $x$ , затем с помощью призмы Глана, выделяющей  $x$ - и  $y$ -поляризацию, направляют на два одноименных детектора (что это значит?). Как измерить нормированную корреляционную функцию  $g_{xy}$ ? Чему она будет равна?
48. Будет ли проявляться эффект «скрытой поляризации» для солнечного света?
49. Определение корреляционной функции второго порядка  $G_{++}$ . Как ее измерить?
50. Определение и схема измерения корреляционной функции  $G_{xx}^{(2)}$ .
51. Укажите два независимых инварианта преобразований поляризации второго порядка по полю и один инвариант четвертого порядка по полю.
52. Один человек (назовем его  $X$ ) утверждает, что когда двухфотонный свет падает на 50%-светоделитель, оба фотона всегда направляются в один выход. Прав ли  $X$ ?
53. Найдите  $\langle a^2 \rangle$  в состоянии «сжатого вакуума»  $|0\rangle + c|2\rangle$ ,  $c \ll 1$ .
54. Покажите, что для сжатого вакуума  $\langle a^2 \rangle$  отлично от нуля, а  $\langle a \rangle$  равно нулю.
55. Найдите нормированную корреляционную функцию второго порядка  $g^{(2)}$  в состоянии «сжатого вакуума»  $|0\rangle + c|2\rangle$ ,  $c \ll 1$ .
56. Нарисуйте схему эксперимента по наблюдению амплитудного сжатия.
57. Нарисуйте схему эксперимента по наблюдению квадратурного сжатия.
58. Запишите преобразования Боголюбова для невырожденного параметрического усилителя. Покажите, что они сохраняют коммутационные соотношения.
59. Изобразите на фазовой плоскости следующие состояния света
  - 1) сжатое по координате;
  - 2) сжатое по фазе;
  - 3) сжатое по числу фотонов;
  - 4) сжатое по фазе и координате одновременно.
60. Как получить в эксперименте двухфотонный свет, не используя спонтанное параметрическое рассеяние?
61. Как получить в эксперименте свет с антигруппировкой, используя спонтанное параметрическое рассеяние?

#### в) Перечень вопросов к зачету

1. Оптика. От древних до Ньютона. От Ньютона до Максвелла.
2. Уравнения Максвелла. Электродинамическая постоянная. Электромагнитная природа света.
3. Структура плоской электромагнитной волны и ее представление в комплексной форме.
4. Плотность потока энергии и импульса электромагнитной волны. Интенсивность волн. Работы П.Н.Лебедева.
6. Излучение электромагнитных волн. Сферические волны.
7. Общий подход к квантованию электромагнитного поля в релятивистской и нерелятивистской теории, Канонические переменные.

8. Схема квантования электромагнитного поля в рамках Гамильтонова формализма
  9. Функции Гамильтона и Лагранжа. Уравнения, описывающие динамику канонических переменных в механике
  10. Скобки Пуассона и динамика произвольных функций от канонических переменных
  11. Естественная ширина линий излучения. Лоренцевский контур.
  12. Соотношение между продолжительностью импульса и шириной спектра.
  13. Интерференция монохроматических волн. Длина и время когерентности.
  10. Ширина интерференционных полос. Полосы равного наклона и равной толщины.
  11. Интерференция немонохроматических волн. Длина и время когерентности.
  12. Многолучевая интерференция. Просветление оптики. Диэлектрические зеркала.
- Интерференционные фильтры.
13. Многолучевой интерферометр Фабри-Перо. Области использования.
  14. Стоячие электромагнитные волны. Опыт Винера.
  15. Дифракция света. Метод зон Френеля. Зонная пластинка.
  16. Дифракция Фраунгофера на щели: качественное и количественное описание.
  17. Дифракция Фраунгофера на двух щелях. Дифракционная решетка.
  18. Дифракция на круглом отверстии. Гауссовы пучки.
  19. Спектральные характеристики дифракционных решеток. Разрешающая способность. Критерий Рэлея.
  20. Синусоидальная решетка. Фазовые решетки. Дифракция Фраунгофера на ультразвуковой волне.
  21. Дифракция на многомерных структурах. Формула Вульфа-Брэггов.
  22. Распространение света в анизотропных средах. Тензор диэлектрической проницаемости. Двойное лучепреломление.
  23. Поляризационные приборы: призма Николя, дихроизм.
  24. Оптические усилители. Отрицательная температура. Условие усиления излучения.
  25. Лазеры. Принципиальная схема. Условие стационарной генерации. Способы модуляции добротности. Моды.
  26. Твердотельный лазер на рубине. Четырехуровневые схемы ОКГ.
  27. Газовый лазер на смеси He-Ne. Механизм создания инверсной заселенности энергетических состояний.
  28. Комбинационное рассеяние света.
  29. Основные положения нелинейной оптики. Оптическое детектирование.
  30. Генерация второй гармоники. Условие фазового синхронизма.
  31. Самовоздействие света в нелинейной среде.
  32. Параметрические процессы в нелинейной среде. ВРМБ и обращение волнового фронта.
  33. Оптика движущихся сред. Эффект Саньяка.
  34. Эффект Доплера в оптике: продольный и поперечный.
  35. Интерферометр Майкельсона. Понятие о Фурье-спектроскопии.
  36. Статистика фотоотсчетов одномодового детектора, точечный детектор поля в квантовом рассмотрении.
  37. Распределение фотоотсчетов при регистрации поля в энергетическом состоянии.

38. Статистика фотоотчетов при регистрации поля с произвольной статистикой фотонов.
39. Формула Скалли-Манделя.
40. Статистика фотоотчетов многомодового детектора, производящая функция, дисперсия числа фотоотчетов.
41. Энергетические состояния для одной и многих мод. Зависимость от времени.
42. Когерентные состояния. Связь с энергетическим базисом. Оператор смещения. Координатные и импульсные состояния. Связь с другими базисами. Смешанные состояния.
43. Матрица плотности в энергетическом представлении. Когерентное  $P$ -представление. Функция Вигнера. Характеристическая функция.
44. Статистика хаотического поля. Признаки неклассичности световых полей.
45. Закон Кирхгофа для среднего числа фотонов в моде.
46. Закон Кирхгофа для шумов квантового усилителя.

## **7. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ**

### **Основная литература**

1. Дифракционная оптика и нанофотоника [Электронный ресурс] / Безус Е.А., Быков Д.А., Досколович Л.Л., Ковалев А.А., Котляр В.В., Налимов А.Г., Порфирьев А.П., Скиданов Р.В., Сойфер В.А., Стафеев С.С., Хонина С.Н. - М. : ФИЗМАТЛИТ, 2014. – 608 с
2. Цуканов, В.Н. Волоконно-оптическая техника [Электронный ресурс] / В.Н. Цуканов, М.Я. Яковлев. - М.: Инфра-Инженерия. - 2011. - 640 с. - ISBN 978-5-9729-0078-7
3. Пространственная структура излучения волноводных и волоконных технологических лазеров [Электронный ресурс] : Учеб. пособие / А. Г. Григорьянц, В. В. Васильцов. - М. : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014, 37 с.

### **Дополнительная литература**

1. Квантовая физика и нанотехнологии [Электронный ресурс]/Неволин В.К.-Издание 2ое, испр. И доп. –М.:Техносфера , 2013, 128с.
2. Лазерные приборы и методы измерения дальности:учеб. Пособие Бокшанский В.Б. и др. Под ред. Карасивова В.Е. Издательство: (МГТУ им. Баумана) 2012г. 92 стр.
3. Андреев А.Н. и др. Оптические измерения –М. : Университетская книга;Логос, 2012, 416с.

## **8. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ**

Применение мультимедийных презентаций и компьютерных симуляций обеспечивается проведением занятий в уже оборудованных мультимедийным оборудованием аудиториях кафедры ФиПМ.

Для обеспечения проведения лабораторных работ имеются компьютерные классы кафедры ФиПМ и специализированные учебно-научные лаборатории, оборудованные современным оборудованием для лазерной диагностики вещества и изучения лазерно-индуцированных процессов.

Рабочая программа дисциплины составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО (уровень подготовки кадров высшей квалификации) по направлению 03.06.01 Физика и астрономия и направленности (профилю) подготовки Лазерная физика

Рабочую программу составил д.ф.-м.н., профессор каф. ФиПМ Аракелян С.М.

доцент каф. ФиПМ Прохоров А.В.

(ФИО, подпись)

(ФИО, подпись)

Рецензент

(представитель работодателя)

Член отдела ФАП "МПРадуга"

Акимов А.А. и. спец. кафедры  
(место работы, должность, ФИО, подпись)

Программа рассмотрена и одобрена на заседании кафедры ФиПМ

Протокол № 135 от 5.06.15 года

Заведующий кафедрой

Аракелян С.М.

(ФИО, подпись)

Рабочая программа рассмотрена и одобрена на заседании учебно-методической комиссии направления 03.06.01 Физика и астрономия и направленности (профилю) подготовки Лазерная физика

Протокол № 135 от 5.06.15 года

Председатель комиссии

Аракелян С.М.

(ФИО, подпись)

### ЛИСТ ПЕРЕУТВЕРЖДЕНИЯ РАБОЧЕЙ ПРОГРАММЫ ДИСЦИПЛИНЫ

Рабочая программа одобрена на \_\_\_\_\_ учебный год

Протокол заседания кафедры № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_ года

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_

Рабочая программа одобрена на \_\_\_\_\_ учебный год

Протокол заседания кафедры № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_ года

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_

Рабочая программа одобрена на \_\_\_\_\_ учебный год

Протокол заседания кафедры № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_ года

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_