

**Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Московский физико-технический институт  
(национальный исследовательский университет)»**

**УТВЕРЖДЕНО**

**и.о. директора физтех-школы  
физики и исследований им.  
Ландау**

**А.А. Воронов**

	<b>Рабочая программа дисциплины (модуля)</b>
<b>по дисциплине:</b>	Квантовая оптика
<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Общая и прикладная физика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра квантовой радиофизики
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 2 (весенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 45 всего, в том числе:

лекции: 15 час.

семинары: 30 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 60 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 135, всего зач. ед.: 3

Программу составил: А.В. Масалов, д-р физ.-мат. наук, старший научный сотрудник

Программа обсуждена на заседании кафедры квантовой радиофизики 25.05.2020

## Аннотация

Дисциплина предназначена для студентов, имеющих базовые знания в области оптики и квантовой механики. Программа курса включает следующие основные разделы: квантовая оптика как область квантовой физики, методы фотоприема и квантовый шум фотодетекторов, основные квантовые состояния света, преобразование квантовых состояний света элементами линейной оптики, источники неклассических состояний света, параметрический процесс как метод генерации сжатого света, особые методы измерений в квантовой оптике. В результате овладения дисциплиной обучающийся получит базовые знания, касающиеся квантовых измерений в оптике и основных явлений, связанных с квантовыми свойствами излучения.

### 1. Цели и задачи

#### Цель дисциплины

– дать студентам базовые знания в области квантовой оптики – важнейшем разделе современной оптики. Курс ориентирован в основном на подготовку физиков-экспериментаторов, которые используют лазерное излучение и выполняют измерения высокой чувствительности.

#### Задачи дисциплины

– ознакомить студентов с основными приемами квантовых измерений в оптике и основными проявлениями квантовых свойств излучения. При этом слушатели получают необходимые сведения для проведения собственных оценок и расчетов квантовых эффектов.

### 2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-3 Способен выбирать и (или) разрабатывать подходы к решению типовых и новых задач в области профессиональной деятельности, учитывая особенности и ограничения различных методов решения	ОПК-3.1 Способен анализировать задачу, планировать пути решения, предлагать и комбинировать способы решения
	ОПК-3.2 Способен использовать исследовательские методы при решении новых задач, применяя знания в различных областях науки (техники)
	ОПК-3.3 Владеет аналитическими и вычислительными методами решения, понимает и учитывает на практике границы применимости получаемых решений
ОПК-5 Способен и готов к повышению квалификации, профессиональному росту и руководству коллективом в сфере своей профессиональной деятельности, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия	ОПК-5.1 Способен работать в коллективе, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия
	ОПК-5.2 Владеет навыком руководства малым коллективом в сфере своей профессиональной деятельности
	ОПК-5.3 Стремится к получению новых знаний, профессиональному и личностному росту
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели
	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты
ПК-2 Способен самостоятельно или в качестве члена (руководителя) малого	ПК-2.1 Способен планировать и проводить научные исследования самостоятельно или в составе научного коллектива

коллектива организовывать и проводить научные исследования и их апробацию	ПК-2.2 Способен проводить апробацию результатов научно-исследовательской работы посредством публикации научных статей и участия в конференциях
ПК-3 Способен профессионально работать с исследовательским и испытательным оборудованием (приборами и установками, специализированными пакетами прикладных программ) в избранной предметной области	ПК-3.1 Понимает принципы работы используемого оборудования (специализированных пакетов прикладных программ)
	ПК-3.3 Способен оценивать точность полученных экспериментальных (численных) результатов

### 3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- перечень и свойства основных квантовых состояний света, применяемых в качестве моделей при описании лазерного излучения;
- правила и способы расчета квантовых состояний излучения при его преобразовании элементами нелинейной оптики;
- основные методы фотоприема.

уметь:

- рассчитывать квантовые шумы фотоприема в сравнении с другими шумами фотоприемных устройств;
- выбирать эффективные пути расчетов квантовых эффектов в рамках шредингеровского, либо гайзенберговского описаний;
- анализировать опыты с одиночными фотонами.

владеть:

- методами оценок и количественного анализа квантовых явлений в оптических установках и приборах;
- приемами расчета квантовой динамики световых пучков в простейших случаях линейного взаимодействия света со средами.

### 4. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий

#### 4.1. Разделы дисциплины (модуля) и трудоемкости по видам учебных занятий

№	Тема (раздел) дисциплины	Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час.			
		Лекции	Семинары	Лаборат. работы	Самост. работа
1	Особенности квантовой оптики как раздела квантовой физики.	2	5		10
2	Методы фотоприема и квантовый шум фотодетекторов.	3	5		10
3	Основные квантовые состояния света.	2	5		10
4	Преобразование квантовых состояний света элементами линейной оптики.	3	5		10
5	Источники неклассических состояний света.	2	5		10
6	Особые методы измерений в квантовой оптике.	3	5		10
Итого часов		15	30		60
Подготовка к экзамену		30 час.			
Общая трудоёмкость		135 час., 3 зач.ед.			

## 4.2. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

Семестр: 2 (Весенний)

### 1. Особенности квантовой оптики как раздела квантовой физики.

Квантовая оптика как раздел квантовой физики. Основные понятия: наблюдаемые величины и состояния объектов.

### 2. Методы фотоприема и квантовый шум фотодетекторов.

Квантовые и другие шумы в процессе фотоприема излучения.

Методы фотоприема излучения: прямой фотоприем, гетеродинамирование и гомодинамирование.

### 3. Основные квантовые состояния света.

N-фотонные состояния света.

Когерентные состояния света.

Тепловое состояние света. Матрица плотности излучения.

Сжатые состояния света.

### 4. Преобразование квантовых состояний света элементами линейной оптики.

Преобразование состояния света при светоделении. Картина Гейзенберга.

Преобразование состояния света при светоделении. Картина Шредингера.

Статистика фотоотсчетов.

### 5. Источники неклассических состояний света.

Параметрический процесс как метод генерации сжатого света.

Примеры квантового описания нелинейно-оптических явлений: генерация второй гармоники, генерация субпуассоновского света.

### 6. Особые методы измерений в квантовой оптике.

Квазивероятность в квантовой оптике.

Томография квантовых состояний света.

Неразрушающие квантовые измерения.

## 5. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)

Учебная аудитория, доска, медиапроектор, экран.

## 6. Перечень рекомендуемой литературы

### Основная литература

1. Оптическая когерентность и квантовая оптика [Текст] = Optical coherence and quantum optics/Л. Мандель, Э. Вольф, -М., Физматлит, 2000
2. Скалли М.О., Зубайри М.С. Квантовая оптика. Москва, «Физматлит», 2003.
3. Mark Fox. Quantum Optics. An Introduction. OXFORD, University Press, 2006.
4. U.Leonhardt. Essential Quantum Optics. Cambridge University Press, 2010.

### Дополнительная литература

1. Квантовая теория света [Текст] / Р. Лоудон ; пер. с англ. А. А. Колоколова ; под ред. Г. В. Скоцкогод - М. Мир, 1976
2. Излучение и шумы в квантовой электронике [Текст]/У. Люиселл , -М., Наука, 1972
3. Фотоны и нелинейная оптика [Текст]/Д. Н. Клышко, -М., Наука, 1980
4. Квантовая статистика линейных и нелинейных оптических явлений [Текст]/Я. Перина , -М., Мир, 1987
5. Knight P.L., Allen L. Concepts of Quantum Optics. Pergamon Press, Oxford-NewYork-Toronto-Sydney-Frankfurt, 1983.

## **7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)**

<http://lib.mipt.ru/> – электронная библиотека Физтеха.  
<http://www.edu.ru> – федеральный портал «Российское образование».  
<http://benran.ru> – библиотека по естественным наукам Российской академии наук.  
<http://matlab.ru> – обучение по продуктам Матлаб.

## **8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень необходимого программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)**

Лекции сопровождаются презентациями с компьютерными демонстрациями схем и видеороликов, демонстрирующих наиболее сложные концепции и динамические процессы по теме лекций.

Студентам рекомендуется решать задачи по теме лекций с использованием компьютерного моделирования в средах Matlab, Matcad и др.

## **9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)**

Студент, изучающий дисциплину, должен с одной стороны, овладеть общим понятийным аппаратом, а с другой стороны, должен научиться применять теоретические знания на практике. В результате изучения дисциплины студент должен знать основные определения дисциплины, уметь применять полученные знания для решения различных задач.

Успешное освоение курса требует напряжённой самостоятельной работы студента в соответствии с данными в рабочей программе. Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение рекомендованной литературы;
- проработку учебного материала, подготовку ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения;
- решение задач, предлагаемых студентам на лекциях и практических занятиях;
- при необходимости подготовку к практическим занятиям, коллоквиумам, экзамену.

Показателем владения материалом служит умение решать задачи. Для формирования умения применять знания на практике студенту необходимо решать как можно больше задач.

Важно добиться понимания изучаемого материала, а не механического его запоминания. При затруднении изучения отдельных тем, вопросов, следует обращаться за консультациями к лектору или преподавателю, ведущему практические занятия.

Возможен промежуточный контроль знаний студентов в виде решения задач в соответствии с тематикой занятий.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

### ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)

<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Общая и прикладная физика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра квантовой радиофизики
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 2 (весенний) - Экзамен

**Разработчик:** А.В. Масалов, д-р физ.-мат. наук, старший научный сотрудник

## 1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-3 Способен выбирать и (или) разрабатывать подходы к решению типовых и новых задач в области профессиональной деятельности, учитывая особенности и ограничения различных методов решения	ОПК-3.1 Способен анализировать задачу, планировать пути решения, предлагать и комбинировать способы решения
	ОПК-3.2 Способен использовать исследовательские методы при решении новых задач, применяя знания в различных областях науки (техники)
	ОПК-3.3 Владеет аналитическими и вычислительными методами решения, понимает и учитывает на практике границы применимости получаемых решений
ОПК-5 Способен и готов к повышению квалификации, профессиональному росту и руководству коллективом в сфере своей профессиональной деятельности, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия	ОПК-5.1 Способен работать в коллективе, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия
	ОПК-5.2 Владеет навыком руководства малым коллективом в сфере своей профессиональной деятельности
	ОПК-5.3 Стремится к получению новых знаний, профессиональному и личностному росту
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели
	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты
ПК-2 Способен самостоятельно или в качестве члена (руководителя) малого коллектива организовывать и проводить научные исследования и их апробацию	ПК-2.1 Способен планировать и проводить научные исследования самостоятельно или в составе научного коллектива
	ПК-2.2 Способен проводить апробацию результатов научно-исследовательской работы посредством публикации научных статей и участия в конференциях
ПК-3 Способен профессионально работать с исследовательским и испытательным оборудованием (приборами и установками, специализированными пакетами прикладных программ) в избранной предметной области	ПК-3.1 Понимает принципы работы используемого оборудования (специализированных пакетов прикладных программ)
	ПК-3.3 Способен оценивать точность полученных экспериментальных (численных) результатов

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Квантовая оптика» обучающийся должен:

### знать:

- перечень и свойства основных квантовых состояний света, применяемых в качестве моделей при описании лазерного излучения;
- правила и способы расчета квантовых состояний излучения при его преобразовании элементами нелинейной оптики;
- основные методы фотоприема.

### уметь:

- рассчитывать квантовые шумы фотоприема в сравнении с другими шумами фотоприемных устройств;
- выбирать эффективные пути расчетов квантовых эффектов в рамках шредингеровского, либо гайзенберговского описаний;
- анализировать опыты с одиночными фотонами.

**владеть:**

- методами оценок и количественного анализа квантовых явлений в оптических установках и приборах;
- приемами расчета квантовой динамики световых пучков в простейших случаях линейного взаимодействия света со средами.

**3. Перечень типовых (примерных) вопросов, заданий, тем для подготовки к текущему контролю**

Не предусмотрено.

**4. Перечень типовых (примерных) вопросов и тем для проведения промежуточной аттестации обучающихся**

Перечень контрольных вопросов к экзамену:

1. Рассчитать квантовые ограничения при фотоприеме слабых оптических сигналов.
2. Рассчитать квантовые ограничения при фотоприеме слабой модуляции интенсивности светового пучка.
3. Проанализировать требования к счетчику одиночных фотонов.
4. Рассчитать распределение вероятности для поля световой волны в когерентном состоянии света.
5. Рассчитать распределение вероятности для поля световой волны в сжатом состоянии света.
6. Рассчитать квантовые флуктуации N-фотонного света в опыте Брауна-Твисса.
7. Вычислить функцию Вигнера света в когерентном состоянии.
8. Составить описание основных квантовых состояний света на языке квазивероятностной функции Вигнера. Провести сопоставление с результатами традиционного описания квантовых состояний.
9. Выполнить квантовое описание опыта Брауна-Твисса и проиллюстрировать результат для различных случаев квантовых состояний света.
10. Выполнить квантовый расчет вероятностей фотоотсчетов в опыте Мандела с двумя фотонами на светоделителе. Дать интерпретацию результата на языке амплитуд вероятностей.
11. Проанализировать эффект сжатого света в интерферометре Маха-Цендера. Привести схемы прецизионных измерений слабых амплитудных и фазовых эффектов среды в интерферометре.

Примеры экзаменационных билетов:

Билет 1.

1. Квантовые и другие шумы в процессе фотоприема излучения. Методы фотоприема излучения: прямой фотоприем, гетеродинамирование и гомодинамирование.
2. Выполнить квантовое описание опыта Брауна-Твисса и проиллюстрировать результат для различных случаев квантовых состояний света.

Билет 2.

1. N-фотонные состояния света.
2. Рассчитать квантовые ограничения при фотоприеме слабых оптических сигналов.

**Критерии оценивания**

Оценка отлично 10 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины, проявляющему интерес к данной предметной области, продемонстрировавшему умение уверенно и творчески применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.



Оценка отлично 9 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 8 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, правильное обоснование принятых решений, с некоторыми недочетами.

Оценка хорошо 7 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но недостаточно грамотно обосновывает полученные результаты.

Оценка хорошо 6 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности.

Оценка хорошо 5 баллов - выставляется студенту, если он в основном знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач достаточно большое количество неточностей.

Оценка удовлетворительно 4 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он освоил основные разделы учебной программы, необходимые для дальнейшего обучения, и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации.

Оценка удовлетворительно 3 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, допускающему ошибки в формулировках базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, слабо владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и с трудом применяет полученные знания даже в стандартной ситуации.

Оценка неудовлетворительно 2 балла - выставляется студенту, который не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных принципов и не умеет использовать полученные знания при решении типовых задач.

Оценка неудовлетворительно 1 балл - выставляется студенту, который не знает основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубейшие ошибки в формулировках базовых понятий дисциплины и вообще не имеет навыков решения типовых практических задач.

## **5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности**

Экзамен проводится по билетам. В каждом билете представлены теоретический вопрос и задача. При проведении устного экзамена обучающемуся предоставляется 30 минут на подготовку. Вопрос обучающегося не должен превышать одного астрономического часа.