

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Новосибирский национальный исследовательский государственный университет»
(Новосибирский государственный университет, НГУ)

**Физический факультет
Кафедра квантовой электроники**



ТВЕРЖДАЮ
Декан ФФ, д.ф.-м.н.
В.Е.Блинов
2022 г.

**Рабочая программа дисциплины
СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОПТИКА 2**

Направление подготовки **03.03.02 Физика**
Направленность (профиль): **Общая и фундаментальная физика**

Форма обучения **Очная**

Семестр	Общий объем	Виды учебных занятий (в часах)				Промежуточная аттестация (в часах)				
		Контактная работа обучающихся с преподавателем			Самостоятельная работа, не включая период сессии	Самостоятельная подготовка к промежуточной аттестации	Контактная работа обучающихся с преподавателем			
		Лекции	Практические занятия	Лабораторные занятия			Консультации	Зачет	Дифференцированный зачет	Экзамен
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
7	72		32		18	18	2			2
Всего 72 часа / 2 зачётные единицы, из них: - контактная работа 36 часа										
Компетенции ПК-2										

Ответственный за образовательную программу
профессор, д.ф.-м.н.

С.В. Цыбуля

Новосибирск 2022

Содержание

1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы.	3
2. Место дисциплины в структуре образовательной программы.....	4
3. Трудоёмкость дисциплины в зачётных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающегося с преподавателем ..	4
4. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам) с указанием отведённого на них количества академических часов и видов учебных занятий.	5
5. Перечень учебной литературы.	6
6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся.	7
7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины.....	7
8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине.	7
9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине.....	7
10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине.	8

1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы.

Курс «Статистическая оптика 2» является базовой дисциплиной в образовательной бакалаврской программе по оптике

Целью курса является ознакомление с понятиями статистического описания оптических явлений; овладение методами статистической оптики; введение в теорию случайных процессов; овладение навыками приложения методов статистической оптики к некоторым современным задачам оптики и лазерной физики.

Дисциплина нацелена на формирование у выпускника следующей профессиональной компетенции:

Результаты освоения образовательной программы (компетенции)	Индикаторы	Результаты обучения по дисциплине
<p>ПК-2 Способность использовать специализированные знания в области физики при решении научных и практических задач в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования</p>	<p>ПК -2.2. Применяет теоретические основы и базовые представления научного исследования в выбранной области фундаментальной и/или экспериментальной физики в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.</p> <p>ПК -2.3. Использует специализированные знания в области физики при выборе методов расчета, проведении статистического анализа экспериментальных данных в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.</p>	<p>Знать теорему Ван Циттерта – Цернике, теорему Шелла, формула Манделя) и свойства гауссовских случайных процессов; понятие фазора, его свойства и приложения к оптическим задачам; основные виды функций плотности вероятностного распределения (однородное, нормальное и экспоненциальное распределения, распределения Рэля, Пуассона, Бернулли, Райса и Бозе-Эйнштейна) и примеры их физической реализации; свойства поляризованного, неполяризованного и частично поляризованного теплового излучения, законы распространения взаимной интенсивности света.</p> <p>Уметь преобразовывать плотности распределения при преобразовании случайных переменных; описывать преобразование статистических сигналов линейной системой (как во временной, так и в частотной областях); использовать теорему Винера-Хинчина при решении научных задач статистической оптики; строить статистические модели процессов, наблюдаемых в экспериментах и рассчитывать характеристики первого и второго порядков.</p> <p>Владеть навыками по измерению временной и пространственной когерентности оптического излучения и его состояний поляризации; методами расчета моментов случайных переменных и процессов навыками решения усложненных задач в области статистической физики; приемами обработки информации с помощью современного программного обеспечения (ПО); базовыми методами статистической оптики при описании частично-поляризованного излучения и его распространения.</p>

2. Место дисциплины в структуре образовательной программы

Курс «Статистическая оптика 2» является базовой дисциплиной в образовательной бакалаврской программе по оптике; изложение материала опирается на знание студентами классической физической оптики (детерминистический подход), основ теории вероятностей, математической статистики и математического анализа.

3. Трудоемкость дисциплины в зачётных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающегося с преподавателем

Семестр	Общий объем	Виды учебных занятий (в часах)				Промежуточная аттестация (в часах)				
		Контактная работа обучающихся с преподавателем			Самостоятельная работа, не включая период сессии	Самостоятельная подготовка к промежуточной аттестации	Контактная работа обучающихся с преподавателем			
		Лекции	Практические занятия	Лабораторные занятия			Консультации	Зачет	Дифференцированный зачет	Экзамен
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
7	72		32		18	18	2			2
Всего 72 часа / 2 зачётные единицы, из них: - контактная работа 36 часа										
Компетенции ПК-2										

Реализация дисциплины предусматривает практическую подготовку при проведении следующих видов занятий, предусматривающих участие обучающихся в выполнении отдельных элементов работ, связанных с будущей профессиональной деятельностью: практические занятия, домашние задания, самостоятельная работа студента, экзамен.

Программой дисциплины предусмотрены следующие виды контроля:

Текущий контроль успеваемости: выборочный опрос, работа обучающегося на практических занятиях.

Промежуточная аттестация: 7-й семестр – экзамен.

Общая трудоемкость рабочей программы дисциплины составляет 72 часа, 2 зачетные единицы:

- практические занятия – 32 часа;
- самостоятельная работа обучающегося в течение года, не включая период сессии – 18 часов.
- самостоятельная подготовка к промежуточной аттестации, консультации, экзамен – 22 часа.

Объём контактной работы обучающегося с преподавателем (практические занятия, консультации, экзамен) составляет 36 часа.

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

№ п/ п	Раздел дисциплины	Неделя семестра	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов и трудоемкость (в часах)				Промежуточная аттестация (в часах)
			Всего	Аудиторные часы		Сам. работа в течение семестра (не включая период сессии)	
				Лекции	Практические занятия		
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Когерентность оптических волн. <i>Промежуточный контроль – тестирование в форме вопросов-ответов. Домашнее задание</i>	1-3	8		6	2	
2	Дифракционно-интерференционные явления в статистической оптике <i>Промежуточный контроль – тестирование в форме вопросов-ответов</i>	4–6	8		6	2	
3	Распространение световых волн через случайные неоднородные среды <i>Промежуточный контроль – тестирование в форме вопросов-ответов</i>	7–9	8		6	2	
4	Основы теории фотоэлектрической регистрации <i>Промежуточный контроль – тестирование в форме вопросов-ответов</i>	10–13	14		8	6	
5	Шумы в интерферометрах <i>Промежуточный контроль – тестирование в форме вопросов-ответов. Сдача домашнего задания</i>	14-16	12		6	6	
6	Групповая консультация		2				2
7	Самостоятельная подготовка студентов к экзамену		18				18
7	Экзамен		2				2
Всего за семестр			72		32	18	2

Программа практических занятий (32 часа)

1. Когерентность оптических волн и ее измерения (6 часов)

Когерентность оптических волн. Опыты Майкельсона и Юнга. Комплексная степень когерентности. Видность интерференционной картины. Взаимная спектральная чистота. Распространение взаимной когерентности. Распространение взаимной спектральной плотности. Комплексная степень спектральной когерентности.

2. Дифракционно-интерференционные явления в статистической оптике (6 часов)

Взаимная интенсивность и теорема Ван Циттерта – Цернике. Дифракция частично-когерентного света на отверстии. Теорема Шелла и дифракция на круглом отверстии. Интерференционная картина от некогерентного квазимонохроматического источника с однородной яркостью. Когерентность высших порядков.

3. Распространение световых волн через случайные неоднородные среды (6 часов)

Случайные неоднородные среды. Оптическая передаточная функция. Случайные поглощающие и фазовые экраны. Распространение волн в протяженной случайной неоднородной среде. Атмосферная модель. Спекл-интерферометрия.

4. Основы теории фотоэлектрической регистрации (8 часов)

Полуклассическая теория фотоэлектрической регистрации. Фотоотчеты для стабилизированного одномодового лазера. Распределение фотоотчетов для поляризованного теплового излучения. Случаи частичной поляризации и частичной пространственной когерентности. Параметр вырождения. Излучение абсолютно черного тела.

5. Шумы в интерферометрах (6 часов)

Шумы в амплитудном интерферометре и интерферометре интенсивностей. Шумы в спекл-интерферометрии.

Самостоятельная работа студентов (36 часов)

Перечень занятий на СРС	Объем, час
решение индивидуальных домашних заданий, подготовка к защитах индивидуальных домашних заданий	18
Подготовка к экзамену	18

5. Перечень учебной литературы.

5.1 Основная литература:

1. С.А. Ахманов и С.Ю. Никитин, Физическая оптика, М: Наука, 2004.
2. Гудмен, Джозеф У. Статистическая оптика / Джозеф У. Гудмен ; пер. с англ. А.А. Кокина / под ред. Г.В. Скродского М. : Мир, 1988 527 с. : ил. Библиогр.в конце глав. ISBN 5030011625 Гудмен, Джозеф У.оптика

5.2 Дополнительная литература:

3. М. Борн, Э. Вольф, «Основы оптики», М: «Наука», 1973.
4. Д.В. Сивухин, «Лекции по физической оптике», Новосибирск: НГУ, 1968-69.
3. Л.Д. Ландау и Е.М. Лифшиц, «Теория поля», М: «Наука», 1986. Дж. Гудмен, «Статистическая оптика», М: «Мир», 1988.
6. С.М. Рытов, «Введение в статистическую радиофизику», Ч. I и II, М: «Наука», 1978.

6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся.

Дополнительные учебно-методические материалы не требуются.

7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины.

Для освоения дисциплины используются следующие ресурсы:

- электронная информационно-образовательная среда НГУ (ЭИОС);
- образовательные интернет-порталы;
- информационно-телекоммуникационная сеть Интернет.

7.1 Современные профессиональные базы данных

Не используются

7.2. Информационные справочные системы

Не используются.

8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине.

Для обеспечения реализации дисциплины используется стандартный комплект программного обеспечения (ПО), включающий регулярно обновляемое лицензионное ПО Windows и MSOffice.

9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине.

Для реализации дисциплины «Статистическая оптика 2» используются специальные помещения:

1. Учебные аудитории для проведения занятий лекционного типа, практических занятий, индивидуальных консультаций, текущего контроля, промежуточной аттестации.

2. Помещения для самостоятельной работы обучающихся.

Учебные аудитории укомплектованы специализированной мебелью и техническими средствами обучения, служащими для представления учебной информации большой аудитории.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет" и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду НГУ и ИЛФ СО РАН.

Реализация дисциплины осуществляется с применением электронного обучения (платформа ZOOM, Skype), где обучение проводится на виртуальных аналогах, позволяющим достигать запланированных результатов по дисциплине.

Для проведения занятий лекционного типа предлагаются следующие наборы демонстрационного оборудования и учебно-наглядных пособий:

- комплект лекций-презентаций по темам дисциплины (используется PowerPoint);

Материально-техническое обеспечение образовательного процесса по дисциплине для обучающихся из числа лиц с ограниченными возможностями здоровья осуществляется согласно «Порядку организации и осуществления образовательной деятельности по образовательным программам для инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья в Новосибирском государственном университете».

10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине.

10.1 Порядок проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине

Текущий контроль

Оценочным средством для текущего контроля успеваемости в части самостоятельной работы является регулярная сдача-приемка домашних заданий.

Промежуточная аттестация

Освоение компетенций оценивается согласно шкале оценки уровня сформированности компетенции. Положительная оценка по дисциплине выставляется в том случае, если заявленная компетенция ПК-2 сформирована не ниже порогового уровня в части, относящейся к формированию способности использовать специализированные знания в области статистической оптики в профессиональной деятельности.

Окончательная оценка работы студента в течение семестра происходит на экзамене. Экзамен проводится в конце семестра в экзаменационную сессию в устной и письменной форме.

Вывод об уровне сформированности компетенций принимается преподавателем. Каждый вопрос билета оценивается от 0 до 5 баллов. Положительная оценка ставится, когда все компетенции освоены не ниже порогового уровня. Оценки «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» означают успешное прохождение промежуточной аттестации.

Соответствие индикаторов и результатов освоения дисциплины

Таблица 10.1

Индикатор	Результат обучения по дисциплине	Оценочные средства
ПК -2.2. Применяет теоретические основы и базовые представления научного исследования в выбранной области фундаментальной и/или экспериментальной физики в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.	Знать теорему Ван Циттерта – Цернике, теорему Шелла, формула Манделя) и свойства гауссовских случайных процессов; понятие фазора, его свойства и приложения к оптическим задачам; основные виды функций плотности вероятностного распределения (однородное, нормальное и экспоненциальное распределения, распределения Рэля, Пуассона, Бернулли, Райса и Бозе-Эйнштейна) и примеры их физической реализации; свойства поляризованного, неполяризованного и частично поляризованного теплового излучения, законы распространения взаимной интенсивности света.	Проведение контрольных работ, экзамен.
ПК-2.3. Использует специализированные знания в области физики при выборе методов расчета, проведении статистического анализа экспериментальных данных в соответствии с профилем подготовки в зависимости от	Уметь преобразовывать плотности распределения при преобразовании случайных переменных; описывать преобразование статистических сигналов линейной системой (как во временной, так и в частотной областях); использовать теорему Винера-Хинчина при решении научных задач статистической оптики; строить статистические модели процессов, наблюдаемых в экспериментах и	Проведение контрольных работ, экзамен.

специфики объекта исследования.	<p>рассчитывать характеристики первого и второго порядков.</p> <p>Владеть навыками по измерению временной и пространственной когерентности оптического излучения и его состояний поляризации; методами расчета моментов случайных переменных и процессов навыками решения усложненных задач в области статистической физики; приемами обработки информации с помощью современного программного обеспечения (ПО); базовыми методами статистической оптики при описании частично-поляризованного излучения и его распространения.</p>	
---------------------------------	--	--

10.2 Описание критериев и шкал оценивания индикаторов достижения результатов обучения по дисциплине «Статистическая оптика 2».

Таблица 10.2

Критери и оценива ния результа тов обучени я	Планируемые результаты обучения (показатели достижения заданного уровня освоения компетенций)	Уровень освоения компетенции			
		Не сформирован (0 баллов)	Пороговый уровень (3 балла)	Базовый уровень (4 балла)	Продвинутый уровень (5 баллов)
1	2	3	4	5	6
Полнота знаний	ПК 2.2	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имеют место грубые ошибки.	Демонстрирует общие знания базовых понятий по темам/разделам дисциплины. Допускается значительное количество негрубых ошибок.	Уровень знаний соответствует программе подготовки по темам/разделам дисциплины. Допускается несколько негрубых/ несущественных ошибок. Не отвечает на дополнительные вопросы.	Уровень знаний соответствует программе подготовки по темам/разделам дисциплины. Свободно и аргументированно отвечает на дополнительные вопросы.
Наличие умений	ПК 2.3	Отсутствие минимальных умений. Не умеет решать стандартные задачи. Имеют место грубые ошибки.	Продемонстрированы частично основные умения. Решены типовые задачи. Допущены негрубые ошибки.	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задания с негрубыми ошибками или с недочетами.	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задания в полном объеме без недочетов и ошибок.

Наличие навыков (владение опытом)	ПК 2.3	Отсутствие владения материалом по темам/разделам дисциплины. Нет навыков в решении стандартных задач. Наличие грубых ошибок.	Имеется минимальный набор навыков при решении стандартных задач с некоторыми недочетами.	Имеется базовый набор навыков при решении стандартных задач с некоторыми недочетами.	Имеется базовый набор навыков при решении стандартных задач без ошибок и недочетов. Продемонстрированы знания по решению нестандартных задач.
-----------------------------------	--------	--	--	--	---

10.3 Типовые контрольные задания и материалы, необходимые для оценки результатов обучения

Задачи по курсу «Статистическая оптика» 7 семестр

1. Пусть имеется некоторый смешанный момент $\overline{x^n y^m}$. Найдите формулу, связывающую его с совместной характеристической функцией $M_{xy}(\omega_x, \omega_y)$.
2. Телеграфный случайный процесс принимает равновероятные значения $+1$ и -1 в случайные моменты времени. Вероятность того, что за время τ произошло n переключений определяется распределением Пуассона: $p_n = \frac{(v\tau)^n}{n!} \exp[-v\tau]$, где v – средняя скорость переключений. Найдите автокорреляционную функцию этого процесса и его спектр мощности.
3. Для частично поляризованного излучения, описывающегося плотностью распределения

$$\rho(I) = \frac{1}{\chi \langle I \rangle} \left[e^{-\frac{2I}{(1+\chi)\langle I \rangle}} - e^{-\frac{2I}{(1-\chi)\langle I \rangle}} \right],$$

выразить стандартное отклонение σ_I через среднюю интенсивность $\langle I \rangle$ и степень поляризации χ .

4. а) Найти среднюю напряжённость поля, создаваемую ансамблем статистически независимых осцилляторов; б) Найти интенсивность этого излучения; в) Найти матрицу когерентности.

5. Покажите, что для любой гауссовской случайной переменной x справедливо соотношение:

$$\langle \exp(ix) \rangle = \exp\left(i\langle x \rangle - 1/2 \langle (\delta x)^2 \rangle\right),$$

где флуктуация $\delta x = x - \langle x \rangle$.

6. Для любого квазимонохроматического случайного поля моменты интенсивности связаны с чётными моментами напряжённости поля соотношением $\langle I^m \rangle = \frac{m!}{(2m-1)!!} \langle E^{2m} \rangle$. Для N -модового излучения со случайными фазами и одинаковыми амплитудами a вычислите $\langle I \rangle, \langle I^2 \rangle, \langle I^3 \rangle$.

7. Имеется источник квазитеплого излучения, интенсивность которого постоянна, а площадь равна A_s . Вычислите площадь когерентности A_c поля излучения на расстоянии z от источника.

8. Оценить радиус продольных корреляций поля, дифрагированного на случайном экране в случае крупномасштабных флуктуаций коэффициента пропускания $kl_i \gg 1$. Использовать конкретный вид автокорреляционной функции коэффициента пропускания: $\Psi_t(q) = \exp[-q^2 l_i^2]$.

9. Пусть падающая волна циркулярно поляризована. Найти зависимость степени эллиптичности рассеянного света ε от угла рассеяния α .

10. Для неполяризованного теплового излучения функция распределения мгновенной интенсивности есть $\rho(I) = \frac{I}{\langle I \rangle^2} \exp\left[-\frac{I}{\langle I \rangle}\right]$. Предполагая, что время усреднения много меньше времени корреляции $T \ll \tau_c$, найти распределение числа фотоотсчётов $P(n)$ и дисперсию числа фотоотсчётов $\langle \delta n^2 \rangle$.

11. Найти волновой параметр вырождения для одномодового лазера с параметрами: мощность 1 мВт, ширина линии 1 МГц, длина волны 600 нм, диаметр пучка 1 мм.

Контрольные вопросы по курсу (7 семестр)

1. Матрица когерентности: определение и свойства. Описать способ определения направления закрученности циркулярно поляризованного света на практике с помощью поляризатора и фазовой пластинки $\lambda/4$.
2. Плотность распределения мгновенной интенсивности для одномодового лазера, работающего существенно выше порога (рассмотреть различные упрощенные статистические модели описания излучения генерации лазера). Плотность распределения в случае многих мод.
3. Определение функции взаимной когерентности. Закон распространения взаимной когерентности в пространстве: решение в виде интеграла (на основе принципа Гюйгенса-Френеля). Теорема Ван Цитгерта-Цернике.
4. Основы теории фотоотсчётов. Формула Планка для теплового излучения. Распределение Пуассона. Формула Манделя.

Примеры индивидуальных домашних заданий

1. Задана случайная переменная x с однородным распределением в интервале $(-\pi/2, \pi/2)$. Найти плотность распределения $\rho(y)$, если известна зависимость: $y=2\sin(x)-1$.
2. Найти среднюю напряжённость поля, создаваемую ансамблем статистически независимых осцилляторов; б) Найти интенсивность этого излучения; в) Найти матрицу когерентности.

Примеры контрольных билетов к экзамену (7 семестр)

Билет 1

1. Когерентность оптических волн. Опыты Майкельсона и Юнга. Комплексная степень когерентности.
2. Получить явный вид матрицы Джонса для поляризатора, ориентированного под углом α к оси x .

3. Задача. Пусть случайные величины x_i некоррелированы. Найдите дисперсию суммы $y = \sum_i x_i$.

Билет 2

1. Фазор – определение. Сумма большого числа случайных фазоров – общая постановка задачи, упрощающие предположения. Распределение длины и фазы результирующего фазора, рэлеевское распределение.

2. Эргодический случайный процесс с автокорреляционной функцией $\Gamma(\tau) = N\delta(\tau)$ поступает на вход линейного инвариантного во времени фильтра с импульсной характеристикой $h(t)$. Выходной сигнал $y(t)$ умножается на запаздывающий вариант сигнала $x(t)$, образуя новый случайный процесс $z(t)$. Показать, что импульсная характеристика фильтра может быть найдена путём измерения зависимости $\langle z(t) \rangle t$ от времени задержки Δ .

3. Задача. Покажите, что для любой гауссовской случайной переменной x справедливо соотношение:

$$\langle \exp(ix) \rangle = \exp\left(i\langle x \rangle - \frac{1}{2}\langle (\delta x)^2 \rangle\right) \quad \text{где флуктуация } \delta x = x - \langle x \rangle.$$

Форма экзаменационного билета представлена на рисунке

<p>МИНОБРНАУКИ РОССИИ</p> <p><i>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет» (Новосибирский государственный университет, НГУ)</i></p> <p>Физический факультет</p>
<p>ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № _____</p> <p>1. 2. 3.</p> <p>Составитель _____ /Ф.И.О. преподавателя/ (подпись)</p> <p>« ____ » _____ 20 ____ г.</p>

Оценочные материалы по промежуточной аттестации, предназначенные для проверки соответствия уровня подготовки по дисциплине требованиям СУОС, хранятся на кафедре-разработчике РПД в печатном и электронном виде.

