

**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 оптики**



Рабочая программа дисциплины

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ КВАНТОВОЙ ОПТИКИ

Направление подготовки: **03.04.02 Физика**

Направленность (профиль): **Физика. 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 итоговой 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
2	144	32	32		58	18	2			2
Всего 144 часа / 4 зачётные единицы, из них: - контактная работа 68 часов										
Компетенции ОПК-1										

Руководитель программы
д.ф.-м.н.

И. Б. Логашенко

Новосибирск, 2026

Содержание

1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы.	3
2. Место дисциплины в структуре образовательной программы.	3
4. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам) с указанием отведённого на них количества академических часов и видов учебных занятий.	4
5. Перечень учебной литературы.	6
6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся.	6
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 итоговой аттестации по дисциплине.	8

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

Дисциплина (курс) «Современные проблемы квантовой оптики» имеет своей целью знакомство обучающихся с основными идеями и методами квантовой теории информации и их реализациями в квантовой оптике.

Дисциплина нацелена на формирование у обучающегося общепрофессиональной компетенции:

Результаты освоения образовательной программы (компетенции)	Индикаторы	Результаты обучения по дисциплине
ПК-1 Способен использовать специализированные знания в области физики при решении поставленных задач в научно-исследовательской деятельности в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.	ПК 1.1 Применяет специализированные знания в области физики при решении конкретных задач в области научных исследований в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования. ПК 1.2 Выбирает наиболее эффективные методы решения конкретных задач в области научных исследований в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.	Знать методы и способы постановки и решения задач физических исследований в области квантовой оптики и квантовой информатики, быть готовым к усвоению новейших принципов инженерии квантовых состояний; сходство и различие подходов к описанию физических явлений с классической и квантовой точек зрения и те ситуации, когда адекватным оказывается только последний подход, основные алгоритмы квантовой криптографии, сущность феномена квантовой телепортации, понятие квантовой нелокальности, сущность и статус неравенства Белла. Уметь применять полученные знания при решении задач и чтении оригинальных статей по квантовой оптике и квантовой информатике. Владеть основами «квантового» стиля мышления, необходимого для успешной работы в области квантовооптических реализаций перспективных технологий обработки информации, коммуникаций и метрологии, понятиями зацепленного квантового состояния, «скалярного бифотона», кубита, элементарных универсальных операций квантовой информатики и её основных алгоритмов.

2. Место дисциплины в структуре образовательной программы.

Дисциплина «Современные проблемы квантовой оптики» реализуется в весеннем семестре для магистрантов, обучающихся по направлению подготовки 03.04.02 Физика. Курс является дисциплиной по выбору, реализуемой кафедрой квантовой оптики, и непосредственным продолжением первой части – «Основ квантовой оптики»; изложение материала опирается на знание студентами

основ квантовой механики и статистической физики, а также курса «Основы квантовой оптики»; обеспечена логическая связь «Современных проблем квантовой оптики» с курсами «Механическое действие лазерного излучения на атом».

Курс в первую очередь предназначен для магистрантов, область будущей профессиональной деятельности которых включает:

- научные исследования, метрологию и инженерную деятельность с использованием квантово-оптических методов и новых квантовых технологий;
- научные и технологические разработки в области квантовой информатики и квантовой оптики.

3. Трудоёмкость дисциплины в зачётных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающегося с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу.

Трудоёмкость дисциплины составляет: 4 зачётные единицы, 144 часа.

Форма промежуточной аттестации: 2 семестр – экзамен.

№		Вид деятельности	Семестр
			2
1		Лекции, ч	32
2		Практические занятия, ч	32
3		Лабораторные занятия, ч	-
4		Занятия в контактной форме, ч из них	68
5		аудиторных занятий, ч	64
6		в электронной форме, ч	-
7		консультаций, час.	2
8		промежуточная аттестация, ч	2
9		Самостоятельная работа, час.	76
10		Всего, ч	144

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

Дисциплина представляет собой полугодовой курс, читаемый во втором семестре магистратуры физического факультета НГУ. Общая трудоемкость дисциплины составляет 4 зачетные единицы, 144 часа.

Программа и основное содержание лекций (32 часа)

Раздел 1. Статистика поляризованного света в квантовой оптике (4 часа)

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.

Раздел 2. Зацепленные состояния (6 часов)

Сходство скалярного бифотона и синглетной пары частиц. Сепарабельные состояния, запутанность. Парадокс Эйнштейна-Подольского-Розена-Бома. Реализм, локальность, «скрытые параметры». Неравенство Белла. Неравенство Белла в квантовой оптике и его проверка. Вывод неравенства Белла через совместное распределение вероятности. Обобщение на случай трёх наблюдателей и схема его проверки в квантовой оптике. Состояние и теорема Гринбергера-Хорна-Цайлингера (теорема Белла без неравенств). Критерий запутанности Переса-Городецки. Квантовая стратегия в игре, использующая запутанность. Гипотеза о «сверхквантовых» корреляциях и их связь с коммуникационной сложностью распределённых вычислений.

Раздел 3. Запрет на «клонирование» квантовых состояний (2 часа)

Его связь с запретом «сверхсветового телеграфа» Герберта. Доказательство невозможности клонирования на основе унитарности и на основе линейности. Схема приближённого универсального клонирования.

Раздел 4. «Квантовая криптография» (2 часа)

Её связь с запретом на клонирование. Протокол BB84. Протокол B92. Протокол E91 (проверка секретности ключа с помощью неравенства Белла).

Раздел 5. Телепортация квантовых состояний (4 часа)

Базис Белла. Идея и экспериментальная реализация квантовой телепортации. Проблемы различения состояний Белла в оптике. Квантовая коммуникация. «Плотная кодировка» при передаче классической информации – инвертирование квантовой телепортации. Пример естественной телепортации запутанности при кросс-рекомбинации радикалов в спиновой химии.

Раздел 6. Идея квантового компьютера (4 часа)

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.

Раздел 7. Основные квантовые алгоритмы (10 часов)

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.

Программа практических занятий (32 часа)

Занятие 1. Проверка выполнения классического неравенства, связывающего дисперсии интенсивности с суммой дисперсий параметров Стокса, для двухмодового сжатого состояния (2 часа)

Занятие 2. Вывод неравенства Белла для четырёх наблюдателей (2 часа)

Занятие 3. Нахождение максимальной величины нарушения неравенства Белла для двух наблюдателей с пост-селекцией пар частиц в запутанном состоянии, тождественном исходному (4 часа)

Занятие 4. Построение схемы получения состояния Гринберга-Хорна-Цайлингера (4 часа)

Занятие 5. Построение схемы симметричного приближённого квантового копирования $1 \rightarrow 2$ и $1 \rightarrow 3$ (2 часа)

Занятие 6. Рассмотрение схемы телепортации состояния квантованной фотонной моды (4 часа)

Занятие 7. Нахождение условий распутывания заданной квантовой операции, обеспечивающие минимальное производство энтропии; нахождение аналогичных условий для n -кратного применения операции и сравнение этих условий со случаем пошаговой минимизации производства энтропии (4 часа)

Занятие 8. Построение конкретной схемы устройства-демонстратора алгоритма Бернштейна-Вазирани для заданного периода. (4 часа)

Занятие 9. Построение алгоритма определения взаимной простоты двух натуральных чисел при распределённых вычислениях (2 часа)

Занятие 10. Изучение нестандартной схемы квантовой поляриметрии с ориентацией на величину шума (4 часа)

Самостоятельная работа студентов (76 часов)

Перечень занятий на СРС	Объем, час
Подготовка к практическим занятиям.	36
Изучение теоретического материала, не освещаемого на лекциях	22
Подготовка к экзамену	18

5. Перечень учебной литературы.

[1] **Ильичёв Л.В.** Элементы квантовой метафизики, ч. 1, 2, 3, НГУ, 2006-2012.
<https://www.iae.nsk.su/ru/departments/2015-12-07-09-12-47>

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

1. Дж. Прескилл Квантовая информация и квантовые вычисления. Том 1, 2. НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2008.
2. Д. Бауместер, А. Экерт, А. Цайлингер Физика квантовой информации М.; Постмаркет, 2002.
3. Карасёв В.П., Масалов А.В. Состояния неполяризованного света в квантовой оптике. Опт. и спектр., т.74, вып.5, 1993, с.928-936.
4. Белинский А.В., Клышко Д.Н. Интерференция света и теорема Белла. УФН, т.163, №8, 1993, с.1-45.
5. Белинский А.В. Обобщённая теорема Белла. ЖЭТФ, т.105, вып.4, 1994, с.818-827.
6. Ekert A. Quantum cryptography based on Bell's theorem. Phys. Rev. Lett., v.67, №6, 1991, p.661-663.
7. Hardy L. Quantum mechanics, local realistic theories and Lorentz-invariant realistic theories. Phys. Rev. Lett., v.68, №20, 1992, p.2981-2984.
8. Bennett C.H., et al. Teleporting an unknown quantum state via dual classical and Einstein-Podolsky-Rosen channels. Phys. Rev. Lett., v.70, №13, 1993, p.1895-1899.
9. Кадомцев Б.Б. Динамика и информация. Редакция журнала «Успехи физических наук», Москва, 1997.
10. Холево А.С. Введение в квантовую теорию информации. М.:МЦНМО, 2002
11. Имре Ш., Балаж Ф. Квантовые вычисления и связь. М.: Физматлит, 2008
12. G. Benenti, G. Casati, G. Strini Principles of Quantum Computation and Information. World Scientific, 2004

13. Mathematics of Quantum Computation. G. Chen and R.K. Brylinski (eds.) Chapman&Hall/CRC, 2002
14. Alan C. Santos Quantum Information Processing via Hamiltonian Inverse Quantum Engineering, arXiv:1804.08493, 2018.

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 MS Office.

Использование специализированного программного обеспечения для изучения дисциплины не требуется.

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

Для реализации дисциплины «Основы квантовой оптики» используются специальные помещения:

1. Учебные аудитории для проведения занятий лекционного типа, практических занятий, курсового проектирования (выполнения курсовых работ), групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля, итоговой и итоговой 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.

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 итоговой аттестации по дисциплине.

10.1 Порядок проведения текущего контроля и итоговой аттестации по дисциплине

Текущий контроль

Текущий контроль успеваемости студента проводится путем выборочного опроса при решении задач на практических занятиях

Промежуточная аттестация

Освоение компетенций оценивается согласно шкале оценки уровня сформированности компетенции. Положительная оценка по дисциплине выставляется в том случае, если заявленная компетенция ОПК-1 сформирована не ниже порогового уровня в части, относящейся к формированию способности свободно владеть знаниями в области квантовой оптики и использовать их в профессиональной деятельности.

Окончательная оценка работы студента в течение семестра происходит на экзамене. Экзамен проводится в конце семестра в экзаменационную сессию по билетам в устной форме. Вопросы билета подбираются таким образом, чтобы проверить уровень сформированности компетенции ОПК-1.

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 итоговой аттестации.

Соответствие индикаторов и результатов освоения дисциплины

Таблица 10.1

Индикатор	Результат обучения по дисциплине	Оценочные средства
ПК 1.1 Применяет специализированные знания в области физики при решении конкретных задач в области научных исследований в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.	Знать методы и способы постановки и решения задач физических исследований в области квантовой оптики и квантовой информатики, быть готовым к усвоению новейших принципов инженерии квантовых состояний; сходство и различие подходов к описанию физических явлений с классической и квантовой точек зрения и те ситуации, когда адекватным оказывается только последний подход, основные алгоритмы квантовой криптографии, сущность феномена квантовой телепортации, понятие квантовой нелокальности, сущность и статус неравенства Белла.	Решение задач, экзамен.

ПК 1.2 Выбирает наиболее эффективные методы решения конкретных задач в области научных исследований в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.	Уметь применять полученные знания при решении задач и чтении оригинальных статей по квантовой оптике и квантовой информатике. Владеть основами «квантового» стиля мышления, необходимого для успешной работы в области квантовооптических реализаций перспективных технологий обработки информации, коммуникаций и метрологии, понятиями зацепленного квантового состояния, «скалярного бифотона», кубита, элементарных универсальных операций квантовой информатики и её основных алгоритмов.	Решение задач, экзамен.
---	--	--------------------------------

10.2 Описание критериев и шкал оценивания индикаторов достижения результатов обучения по дисциплине «Современные проблемы квантовой оптики».

Таблица 10.2

Критерии оценивания результатов обучения	Шкала оценивания
Экзамен: – самостоятельность, осмысленность, структурированность, логичность и аргументированность изложения материала, – точность и корректность применения терминов и понятий, – наличие исчерпывающих ответов на дополнительные вопросы. При изложении ответа на вопрос(ы) преподавателя обучающийся мог допустить не принципиальные неточности.	<i>Отлично</i>
Экзамен: – самостоятельность, осмысленность, структурированность, логичность и аргументированность изложения материала, – точность и корректность применения терминов и понятий при наличии незначительных ошибок, – наличие полных ответов на дополнительные вопросы с возможным присутствием ошибок.	<i>Хорошо</i>
Экзамен: – самостоятельность и осмысленность в изложении материала, наличие ошибок в логике и аргументации, а также затруднений при формулировке собственных суждений, – корректность применения терминов и понятий, с множественными ошибками, – наличие неполных и/или содержащих существенные ошибки ответов на дополнительные вопросы.	<i>Удовлетворительно</i>

Экзамен: – отсутствие осмысленности, структурированности, логичности и аргументированности в изложении материала, – грубые ошибки в применении терминов и понятий, – отсутствие ответов на дополнительные вопросы.	<i>Неудовлетворительно</i>
--	-----------------------------------

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

Примеры заданий для самостоятельного решения

- Вывести неравенство Белла для четырёх наблюдателей
- Построить схему получения состояния Гринберга-Хорна-Цайлингера
- Построить схему симметричного приближённого квантового копирования $1 \rightarrow 2$ и $1 \rightarrow 3$
- Построить конкретную схему устройства-демонстратора алгоритма Бернштейна-Вазирани для заданного периода.

Вопросы, выносимые на экзамен

1. Параметры Стокса классической световой волны. Сфера Пуанкаре.
2. Запрет на копирование квантовых состояний (доказательство из унитарности и доказательство из линейности, связь запрета на копирование с запретом на «сверхсветовой телеграф»)
3. Соотношение дисперсии интенсивности и дисперсий параметров Стокса классической световой волны (вывод неравенства)
4. Неравенство Белла для трёх наблюдателей (без вывода), его нарушение для состояния Гринбергера-Хорна-Цайлингера в схеме с фотонами)
5. Схема измерения параметров Стокса
6. Квантовая телепортация и «плотная кодировка» (схема первого эксперимента по телепортации)
7. Параметры Стокса квантованной световой волны (соотношения коммутации, аналогия с квантовым угловым моментом)
8. Квантовое состояние с нулевой дисперсией для всех параметров Стокса – скалярный бифотон (аналогия с синглетным состоянием)
9. Неравенство Белла для двух наблюдателей (вывод из модели «скрытых параметров»).
10. Алгоритм Гровера
11. Нарушение неравенства Белла в квантовой физике (вариант для частиц со спином и вариант для фотонов)
12. Алгоритм Бернштейна-Вазирани
13. Квантовая криптография – секретное распределение ключа (протоколы BB-84, B-92)
14. Реализация элемента C-NOT методами линейной оптики
15. Основы квантовых вычислительных схем: кубит, n-кубитовый регистр, элемент Адамара, C-NOT, элемент Тоффли, контролируемое изменение фазы и его связь с C-NOT, квантовый параллелизм, квантовый оракул.
16. Алгоритм Дойча-Йожи
17. Критерий запутанности Переса-Городецки. Иллюстрация его на примере состояния Вернера.
18. Алгоритм Саймона.
19. Универсальный набор элементов в квантовой компьютерике.
20. Вывод неравенства Белла через совместное распределение вероятности.
21. Сепарабельность и запутанность для чистых и смешанных состояний.
22. Телепортация запутанности на примере кросс-рекомбинации радикалов в спиновой химии.

Пример экзаменационного билета

1. Реализация элемента C-NOT методами линейной оптики.
2. Схема измерения параметров Стокса.
3. Практическое задание: предложить схему создания зацепленных состояний двух кубитов с помощью элемента C-NOT.

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