

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет
им. Н.И. Лобачевского»**

Физический факультет

УТВЕРЖДЕНО

решением Ученого совета ННГУ

протокол № 4 от 26.04.2024 г.

Рабочая программа дисциплины

Технологии квантовых коммуникаций

Уровень высшего образования

Магистратура

Направление подготовки / специальность

28.04.01 - Нанотехнологии и микросистемная техника

Направленность образовательной программы

Квантовые и нейроморфные технологии

Форма обучения

очная

г. Нижний Новгород

2025 год начала подготовки

1. Место дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина Б1.В.06.02 Технологии квантовых коммуникаций относится к части, формируемой участниками образовательных отношений образовательной программы.

2. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями и индикаторами достижения компетенций)

Формируемые компетенции (код, содержание компетенции)	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), в соответствии с индикатором достижения компетенции		Наименование оценочного средства	
	Индикатор достижения компетенции (код, содержание индикатора)	Результаты обучения по дисциплине	Для текущего контроля успеваемости	Для промежуточной аттестации
ПК-3: Способен разрабатывать физические и математические модели, проводить компьютерное моделирование исследуемых физических процессов в области нанотехнологии, нанoeлектроники и квантовых технологий	<p>ПК-3.1: Имеет представление о физических и математических моделях, а также методах компьютерного моделирования исследуемых физических процессов в области нанотехнологии, нанoeлектроники и квантовых технологий</p> <p>ПК-3.2: Может применять физические и математические модели, а также методы компьютерного моделирования исследуемых физических процессов в области нанотехнологии, нанoeлектроники и квантовых технологий</p> <p>ПК-3.3: Разрабатывает физические и математические модели, а также методы компьютерного моделирования исследуемых физических процессов в области нанотехнологии, нанoeлектроники и квантовых технологий</p>	<p>ПК-3.1:</p> <p>Знать основные физические принципы кодирования квантовой информации по оптическим каналам связи.</p> <p>Уметь с физической точки зрения анализировать устойчивость квантового канала связи по отношению к атакам злоумышленников.</p> <p>Владеть навыками моделирования передачи информации по оптическим каналам связи.</p> <p>ПК-3.2:</p> <p>Знать основные математические принципы кодирования квантовой информации по оптическим каналам связи.</p> <p>Уметь анализировать свойства квантового канала связи.</p> <p>Владеть навыками моделирования оптических каналов связи для передачи защищенной квантовой информации.</p> <p>ПК-3.3:</p> <p>Знать основные физические и</p>	Тест	Экзамен: Контрольные вопросы

		<p>математические принципы передачи информации по оптическим каналам связи.</p> <p>Уметь с математической точки зрения анализировать устойчивость квантового канала связи по отношению к атакам злоумышленников.</p> <p>Владеть навыками проектирования оптических каналов связи для передачи защищенной квантовой информации.</p>		
--	--	--	--	--

3. Структура и содержание дисциплины

3.1 Трудоемкость дисциплины

	очная
Общая трудоемкость, з.е.	3
Часов по учебному плану	108
в том числе	
аудиторные занятия (контактная работа):	
- занятия лекционного типа	16
- занятия семинарского типа (практические занятия / лабораторные работы)	16
- КСР	2
самостоятельная работа	38
Промежуточная аттестация	36 Экзамен

3.2. Содержание дисциплины

(структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий)

Наименование разделов и тем дисциплины	Всего (часы)	в том числе			
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы из них			Самостоятельная работа обучающегося, часы
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа (практические занятия/лабораторные работы), часы	Всего	
	о ф о	о ф о	о ф о	о ф о	о ф о
1. Основные понятия квантовой теории информации	16	2	2	4	12
2. Квантовые оптические технологии	18	6	6	12	6

3. Квантовая передача и переработка информации	16	2	2	4	12
4. Основы квантовой криптографии	20	6	6	12	8
Аттестация	36				
КСР	2			2	
Итого	108	16	16	34	38

Содержание разделов и тем дисциплины

1. Основные понятия квантовой теории информации.

Классическая и квантовая информация. Биты и кубиты. Меры информации и перепутанности. Энтропия и информация. Эволюция открытой квантовой системы. Динамическое отображение. Представление Крауса. Квантовые каналы. Квантовые измерения. Проекционные и POVM-измерения.

2. Квантовые оптические технологии.

Источники однофотонных и перепутанных двухфотонных состояний света. Одиночные квантовые системы. Источники на основе спонтанного параметрического рассеяния и четырёхволнового смешения. Методы детектирования однофотонных состояний. Фотоэлектронные умножители. Лавинные фотодиоды. Сверхпроводниковые детекторы. Преобразование фотонов по частоте. Оптическая квантовая память. Методы записи и воспроизведения квантовых состояний на основе нерезонансного рамановского взаимодействия, фотонного эха и электромагнитно-индуцированной прозрачности. Перспективные носители квантовой информации.

3. Квантовая передача и переработка информации.

Оптическая квантовая связь. Оптоволоконный и атмосферный квантовые каналы. Экспериментальные реализации квантовой телепортации и квантового распределения ключа. Варианты атак и оценка безопасности. Аппаратно-независимая квантовая криптография.

4. Основы квантовой криптографии.

Одноразовые ключи. Критерий Шеннона абсолютной секретности. Квантово-механические запреты на копирование неизвестного квантового состояния. Основные протоколы квантового распределения ключей и их реализации: BB84, B92, E91, SARG04, фазово-временное кодирование, дифференциально-фазовое кодирование. Критическая ошибка протоколов квантового распределения ключей. Достижимая информация подслушивателя. Связь с квантовыми пропускными способностями. Фундаментальная граница Холево для достижимой классической информации. Исправление ошибок в первичных ключах в квантовой криптографии. Классические энтропии Реньи и их роль в квантовой криптографии. Методы усиления секретности. Методы коррекции ошибок.

4. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся

Самостоятельная работа обучающихся включает в себя подготовку к контрольным вопросам и заданиям для текущего контроля и промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины приведенным в п. 5.

Авторские презентации по материалам лекций.

5. Фонд оценочных средств для текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)

5.1 Типовые задания, необходимые для оценки результатов обучения при проведении текущего контроля успеваемости с указанием критериев их оценивания:

5.1.1 Типовые задания (оценочное средство - Тест) для оценки сформированности компетенции ПК-3:

Вопрос 1. Чем кодируется состояние «летающего» кубита (flying qubit)?

Ответ а): поляризацией;

Ответ б): зарядом;

Ответ в): фазой.

Вопрос 2. Какой из перечисленных протоколов квантовой криптографии использует парадокс Эйнштейна-Подольского-Розена?

Ответ а): BB84;

Ответ б): E91;

Ответ в): B92.

Вопрос 3. Какой из перечисленных протоколов шифрования относится к квантовым?

Ответ а): MICKEY;

Ответ б): IDEA;

Ответ в): BBM92.

Вопрос 4. Кросс-энтропия как функция потерь предназначена для:

Ответ а): измерения разницы между двумя распределениями вероятностей;

Ответ б): измерения отклонения предсказанных классов от представленных в датасете;

Ответ в): оптимизации среднеквадратичной функции потерь.

Критерии оценивания (оценочное средство - Тест)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	Не менее 60% правильных ответов на вопросы из теста
не зачтено	Менее 60% правильных ответов на вопросы из теста

5.2. Описание шкал оценивания результатов обучения по дисциплине при промежуточной аттестации

Шкала оценивания сформированности компетенций

Уровень сформированности компетенций (индикатора дости́ж	плохо	неудовлетворительно	удовлетворительно	хорошо	очень хорошо	отлично	превосходно
	не зачтено		зачтено				

ения компет							
<u>Знания</u>	Отсутствие знаний теоретического материала. Невозможность оценить полноту знаний вследствие отказа обучающегося от ответа	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имели место грубые ошибки	Минимально допустимый уровень знаний. Допущено много негрубых ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько негрубых ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько несущественных ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Ошибок нет.	Уровень знаний в объеме, превышающем программу подготовки.
<u>Умения</u>	Отсутствие минимальных умений. Невозможность оценить наличие умений вследствие отказа обучающегося от ответа	При решении стандартных задач не продемонстрированы основные умения. Имели место грубые ошибки	Продемонстрированы основные умения. Решены типовые задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, но не в полном объеме	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания в полном объеме, но некоторые с недочетами	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания в полном объеме, но некоторые с недочетами.	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с отдельными и несущественными недочетами, выполнены все задания в полном объеме	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном объеме без недочетов
<u>Навыки</u>	Отсутствие базовых навыков. Невозможность оценить наличие навыков вследствие отказа обучающегося от ответа	При решении стандартных задач не продемонстрированы базовые навыки. Имели место грубые ошибки	Имеется минимальный набор навыков для решения стандартных задач с некоторыми недочетами	Продемонстрированы базовые навыки при решении стандартных задач с некоторыми недочетами	Продемонстрированы базовые навыки при решении стандартных задач без ошибок и недочетов	Продемонстрированы навыки при решении нестандартных задач без ошибок и недочетов	Продемонстрирован творческий подход к решению нестандартных задач

Шкала оценивания при промежуточной аттестации

Оценка		Уровень подготовки
зачтено	превосходно	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «превосходно», продемонстрированы знания, умения, владения по соответствующим компетенциям на уровне выше предусмотренного программой
	отлично	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «отлично».
	очень хорошо	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «очень хорошо»
	хорошо	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «хорошо».

	удовлетворительно	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «удовлетворительно», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «удовлетворительно»
не зачтено	неудовлетворительно	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «неудовлетворительно».
	плохо	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «плохо»

5.3 Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения на промежуточной аттестации с указанием критериев их оценивания:

5.3.1 Типовые задания (оценочное средство - Контрольные вопросы) для оценки сформированности компетенции ПК-3

1. Квантовая и классическая информация. Биты и кубиты. Квантовая запутанность.
2. Квантовая и классическая энтропия.
3. Описание эволюции квантовой системы. Релаксация и декогеренция. Источники потерь.
4. Квантовые каналы связи. Классификация, особенности.
5. Квантовые измерения. Классификация, особенности.
6. Источники однофотонных и перепутанных двухфотонных состояний света.

Критерии оценивания (оценочное средство - Контрольные вопросы)

Оценка	Критерии оценивания
превосходно	обучающийся продемонстрировал уровень знаний в объеме, превышающем стандартную программу подготовки, и продемонстрировал творческий подход к выполнению практических заданий повышенного уровня сложности
отлично	обучающийся продемонстрировал связное изложение всех теоретических положений курса и успешно показал умения и навыки выполнения практических заданий повышенного уровня сложности
очень хорошо	обучающийся продемонстрировал связное изложение практически всех теоретических положений курса и успешно показал умения и навыки выполнения стандартных практических заданий
хорошо	обучающийся продемонстрировал связное изложение основных теоретических положений курса и успешно показал умения и навыки выполнения стандартных практических заданий
удовлетворительно	обучающийся продемонстрировал изложение формулировок основных теоретических положений курса и успешно показал умения и навыки выполнения практических заданий базового уровня сложности
неудовлетворительно	обучающийся не продемонстрировал представления об основных

Оценка	Критерии оценивания
	теоретических разделах курса, не показал минимально допустимый уровень умений и навыков выполнения практических заданий
плохо	обучающийся не продемонстрировал никаких знаний об основных теоретических разделах курса, не показал никаких умений и навыков выполнения практических заданий

6. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины (модуля)

Основная литература:

1. Белоусов Ю. И. Инфракрасная фотоника : учебное пособие для вузов / Белоусов Ю. И., Постников Е. С.; Постников Е. С. - 2-е изд., стер. (полноцветная печать). - Санкт-Петербург : Лань, 2023. - 340 с. - Книга из коллекции Лань - Физика. - ISBN 978-5-507-46496-8., <https://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=860965&idb=0>.
2. Былина М. С. Перспективные оптические инфокоммуникационные технологии. Эволюция, современное состояние и перспективы развития оптических волокон : учебное пособие / Былина М. С., Глаголев С. Ф., Хаджаев М. С. - Санкт-Петербург : СПбГУТ им. М.А. Бонч-Бруевича, 2023. - 99 с. - Книга из коллекции СПбГУТ им. М.А. Бонч-Бруевича - Инженерно-технические науки. - ISBN 978-5-89160-302-8., <https://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=918590&idb=0>.
3. Плёткин А.П. Квантово-криптографические сети : учебное пособие / Плёткин А.П.; Прудников В.А.; Юшицына В.В. - Москва : ЮФУ, 2024. - 124 с. - ISBN 978-5-9275-4595-7., <https://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=914123&idb=0>.

Дополнительная литература:

1. Чуканов С. Н. Квантовая теория информации : учебное текстовое электронное издание локального распространения / Чуканов С. Н., Чуканов И. С., Белик А. Г. - Омск : ОмГТУ, 2023. - 164 с. - Рекомендовано редакционно-издательским советом Омского государственного технического университета. - Книга из коллекции ОмГТУ - Информатика. - ISBN 978-5-8149-3680-6., <https://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=900290&idb=0>.
2. Фотоника и оптоинформатика. Основы волоконной оптики: лабораторный практикум / Азанова И. С., Вотинов Г. Н., Кирчанов В. С., Булатов М. И., Григорьев Н. С., Мальков Н. А. - Пермь : ПНИПУ, 2023. - 101 с. - Утвержден Редакционно-издательским советом университета. - Книга из коллекции ПНИПУ - Физика. - ISBN 978-5-398-03006-8., <https://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=899231&idb=0>.

Программное обеспечение и Интернет-ресурсы (в соответствии с содержанием дисциплины):

- 1) ОС Windows и пакет Office;
- 2) Интернет-ресурс справочной и математической литературы со свободным доступом

www.eqworld.ipmnet.ru;

3) интернет-ресурсы Фундаментальной библиотеки ННГУ <http://www.lib.unn.ru/>.

7. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)

Учебные аудитории для проведения учебных занятий, предусмотренных образовательной программой, оснащены мультимедийным оборудованием (проектор, экран), техническими средствами обучения, специализированным оборудованием: лабораторным оборудованием ННГУ.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет" и обеспечены доступом в электронную информационно-образовательную среду.

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки/специальности 28.04.01 - Нанотехнологии и микросистемная техника.

Автор(ы): Конаков Антон Алексеевич, кандидат физико-математических наук.

Рецензент(ы): Багракова Марина Валерьевна, кандидат физико-математических наук.

Заведующий кафедрой: Конаков Антон Алексеевич, кандидат физико-математических наук.

Программа одобрена на заседании методической комиссии от 15.04.2024, протокол № б/н.