

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



Согласовано, декан ФФ  
 Блинов В.Е.

«09» \_\_\_\_\_ 2022г.

## РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

### ОПТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ КВАНТОВОЙ ИНФОРМАТИКИ

Научная специальность: 1.3 Физические науки

Направленность (профиль): Лазерная 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 в период занятий			Консультации	Зачет	Дифференцированный зачет	Экзамен
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
По выбору	72	16	16			18	18	2			2
Всего 72 часа / 2 зачетные единицы, в т.ч. - контактная работа 36 часов											

Разработчики:

к.ф-м. н., И.И. Бетеров

Заведующий кафедрой лазерной физики ФФ

д.ф-м. н., ак. С.Н. Багаев

Ответственный за образовательную программу:

д.ф-м. н., проф. С.В. Цыбуля

Новосибирск, 2022

## Содержание

Аннотация .....	3
Введение .....	4
1. Результаты освоения дисциплины .....	4
2. Трудоемкость дисциплины по видам учебных занятий .....	5
3. Содержание дисциплины .....	5
4. Перечень учебно-методических материалов, необходимых для изучения дисциплины (модуля) .....	6
5. Перечень учебных изданий, необходимых для освоения дисциплины (модуля) .....	6
6. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине .....	6
7. Оценочные средства для проведения промежуточной аттестации обучающихся по дисциплине (модулю) .....	6
Типовые контрольные задания и иные материалы, необходимые для оценки результатов освоения дисциплины (оценочные материалы) .....	10

## Аннотация

Рабочая программа дисциплины Оптические технологии квантовой информатики реализуется на физическом факультете как элективная дисциплина в рамках научной специальности 1.3 Физические науки Направленность (профиль) Лазерная физика и разработана в соответствии с паспортом научной специальности Лазерная физика, Порядком прикрепления лиц для сдачи кандидатских экзаменов, сдачи кандидатских экзаменов и их перечнем и федеральными государственными требованиями к структуре программ подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре (адъюнктуре), условиям их реализации, сроками освоения этих программ с учетом различных форм обучения, образовательных технологий и особенностей отдельных категорий аспирантов (адъюнктов).

Настоящая программа курса посвящена современным проблемам квантовой информатики и оптическим технологиям, используемым для передачи и обработки квантовой информации, включая реализацию квантовых вычислений и квантовую криптографию.

Для начала обучения данной дисциплине необходима базовая подготовка по следующим разделам физики: квантовая механика, электродинамика

Цель курса: познакомить обучающихся с базовыми понятиями современной квантовой информатики, основными квантовыми алгоритмами, сформировать основные представления о физических системах, используемых в качестве платформы для квантовых вычислений.

Задачи курса:

- сформировать представление о современном состоянии исследований в области современной квантовой информатики;
- освоить основные методы реализации квантовых алгоритмов, в том числе использованием оптических технологий;
- изучить особенности реализации квантовых вычислений с использованием различных физических платформ.

Результат освоения дисциплины:

- владение основными квантовыми алгоритмами и методами их экспериментальной реализации;
- знание особенностей физических систем для выполнения квантовых вычислений и других задач квантовой обработки информации;
- умение анализировать современную научную литературу по тематике квантовых информационных технологий.

Преподавание дисциплины предусматривает следующие формы организации учебного процесса: лекции, практические занятия, самостоятельная работа обучающегося.

Общий объем дисциплины – 2 зачетные единицы (72 часа).

Форма промежуточной аттестации – экзамен.

## Введение

Рабочая программа дисциплины Оптические технологии квантовой информатики реализуется на физическом факультете как элективная дисциплина в рамках научной специальности 1.3 Физические науки Направленность (профиль) Лазерная физика и разработана в соответствии с паспортом научной специальности Лазерная физика, Порядком прикрепления лиц для сдачи кандидатских экзаменов, сдачи кандидатских экзаменов и их перечнем и федеральными государственными требованиями к структуре программ подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре (адъюнктуре), условиям их реализации, сроками освоения этих программ с учетом различных форм обучения, образовательных технологий и особенностей отдельных категорий аспирантов (адъюнктов).

Настоящая программа посвящена современным проблемам квантовой информатики и оптическим технологиям, используемым для передачи и обработки квантовой информации, включая реализацию квантовых вычислений и квантовую криптографию.

Для начала обучения данной дисциплине необходима базовая подготовка по следующим разделам физики: квантовая механика, электродинамика.

Цель курса: познакомить обучающихся с базовыми понятиями современной квантовой информатики, основными квантовыми алгоритмами, сформировать основные представления о физических системах, используемых в качестве платформы для квантовых вычислений.

Задачи курса:

- сформировать представление о современном состоянии исследований в области современной квантовой информатики;
- освоить основные методы реализации квантовых алгоритмов, в том числе использованием оптических технологий;
- изучить особенности реализации квантовых вычислений с использованием различных физических платформ.

Преподавание дисциплины предусматривает следующие формы организации учебного процесса: лекции, практические занятия, самостоятельная работа обучающегося.

Общий объем дисциплины – 2 зачетные единицы (72 часа).

Форма промежуточной аттестации – экзамен.

### 1. Результаты освоения дисциплины

Результат освоения дисциплины:

- владение основными квантовыми алгоритмами и методами их экспериментальной реализации;
- знание особенностей физических систем для выполнения квантовых вычислений и других задач квантовой обработки информации;
- умение анализировать современную научную литературу по тематике квантовых информационных технологий.

## 2. Трудоемкость дисциплины по видам учебных занятий

Трудоемкость дисциплины – 2 з.е. (72 ч)

Форма промежуточной аттестации: экзамен

№	Вид деятельности	Количество часов
1.	Лекции, ч	16
2.	Практические занятия, ч	16
3.	Занятия в контактной форме, ч из них	36
4.	аудиторных занятий, ч	32
5.	в электронной форме, ч	
6.	консультаций, час.	2
7.	промежуточная аттестация, ч	2
8.	Самостоятельная работа, час.	36
9.	Всего, ч	72

## 3. Содержание дисциплины

### Лекции (16 ч)

Наименование темы и их содержание	Объем, час
Введение в квантовую информатику	2
Основы физической реализации квантовых вычислений	2
Сверхплотное кодирование и квантовая телепортация	4
Основные квантовые алгоритмы	4
Физическая реализация квантовых вычислений оптическими методами	4

### Практические занятия (16 ч)

Содержание практического занятия	Объем, час
Основы физической реализации квантовых вычислений.	2
Сверхплотное кодирование и квантовая телепортация	2
Квантовое преобразование Фурье и его приложения	4
Квантовое программирование	4
Физическая реализация квантовых вычислений оптическими методами	4

### Самостоятельная работа студентов (36 ч)

Перечень занятий на СРС	Объем, час
Подготовка к практическим занятиям.	6
Выполнение домашнего задания в рамках портфолио	4
Изучение теоретического материала, не освещаемого на лекциях	4
Подготовка презентации доклада	2
Подготовка реферата	2
Подготовка к экзамену	18

#### **4. Перечень учебно-методических материалов, необходимых для изучения дисциплины (модуля)**

1. А. Стин Квантовые вычисления — Ижевск, «РХД», 2019. — 113 с. [https://rusneb.ru/catalog/000199\\_000009\\_07000491239/](https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_07000491239/)

#### **5. Перечень учебных изданий, необходимых для освоения дисциплины (модуля)**

2. Ф. Риле Стандарты частоты: принципы и приложения / Ф. Риле; пер. с англ. Н.Н. Колачевского .— Москва : Физматлит, 2009 .— 511 с. : ил. ; 24 см. — Пер. изд.: Frequency standards: Basics and Applications / Fritz Riehle. - Wiley-VCH .— Библиогр.: с. 463-511.(1 экз.)

#### **6. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине**

Для реализации дисциплины используются специальные помещения:

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

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

- комплект лекций-презентаций по темам дисциплины;

Материально-техническое обеспечение образовательного процесса по дисциплине для аспирантов 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».

#### **7. Оценочные средства для проведения промежуточной аттестации обучающихся по дисциплине (модулю)**

Перечень результатов освоения дисциплины представлен в разделе 1.

##### ***7.1 Порядок проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине***

##### ***Текущий контроль успеваемости:***

Текущий контроль успеваемости включает контроль посещаемости обучающимися занятий, оценку их активности в ходе дискуссий, представление доклада по тематике,

связанной с выполнением научной работы обучающегося, и проверку заданий для самостоятельного решения.

**Промежуточная аттестация:**

Промежуточная аттестация проводится в форме экзамена. Требования разработаны в соответствии со следующими документами:

- паспорт научной специальности Лазерная физика,
- федеральные государственные требования к структуре программ подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре (адъюнктуре), условиям их реализации, срокам освоения этих программ с учетом различных форм обучения, образовательных технологий и особенностей отдельных категорий аспирантов (адъюнктов).

Оценка уровня знаний экзаменуемого определяется по пятибалльной шкале: «отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно».

**Описание критериев и шкал оценивания результатов освоения дисциплины**

Таблица 7.1 Результаты освоения дисциплины

Результат освоения дисциплины	Оценочное средство
- владение основными квантовыми алгоритмами и методами их экспериментальной реализации;	Портфолио Экзамен
- знание особенности физических систем для выполнения квантовых вычислений и других задач квантовой обработки информации;	Портфолио Экзамен
- умение анализировать современную научную литературу по тематике квантовых информационных технологий	Портфолио Экзамен

Таблица 7.2 Критерии оценивания результатов освоения дисциплины

Критерии оценивания результатов освоения дисциплины	Шкала оценивания
<p><b><u>Доклады и выступления</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– знает актуальные исследования и критически анализирует результаты предшественников и современные достижения в области физики в применении к профессиональной области деятельности,</li> <li>– умеет ставить задачи научно-исследовательской деятельности на основе сопоставительного анализа современных достижений физики, в части постановки актуальных задач научных исследований в применении к профессиональной области деятельности и в зависимости от специфики объекта исследования,</li> <li>– знает возможные направления профессиональной самореализации,</li> <li>- владеет приемами планирования и оценки собственной деятельности по решению профессионально-значимых задач,</li> <li>– точность и полнота выделения, классификации и систематизации основного смыслообразующего компонента из источников и литературы.</li> </ul> <p>В докладах и выступлениях обучающийся мог допустить непринципиальные неточности.</p> <p><b><u>Решение типовых задач:</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– умеет определять и применять современные научные методы при решении практических задач,</li> </ul>	Отлично

<p>– точность ответа, отсутствие ошибок.</p> <p><b>Экзамен:</b></p> <p>– демонстрирует углубленные знания базовых понятий, моделей, гипотез и концепций, свободно владеет всеми основными разделами современной физики,</p> <p>– самостоятельность, осмысленность, структурированность, логичность и аргументированность изложения материала, отсутствие затруднений в объяснении процессов и явлений, а также при формулировке собственных суждений,</p> <p>– наличие исчерпывающих ответов на дополнительные вопросы.</p> <p>При изложении ответа на вопрос(ы) экзаменационного билета обучающийся мог допустить принципиальные неточности.</p>	
<p><b>Доклады и выступления</b></p> <p>– знает актуальные исследования и критически анализирует результаты предшественников и современные достижения в области физики в применении к профессиональной области деятельности,</p> <p>– умеет ставить задачи научно-исследовательской деятельности на основе сопоставительного анализа современных достижений физики, в части постановки актуальных задач научных исследований в применении к профессиональной области деятельности и в зависимости от специфики объекта исследования,</p> <p>– знает возможные направления профессиональной самореализации,</p> <p>- владеет приемами планирования и оценки собственной деятельности по решению профессионально-значимых задач,</p> <p>– точность и полнота выделения, классификации и систематизации основного смыслообразующего компонента из источников и литературы.</p> <p>В докладах и выступлениях обучающийся мог допустить неточности, не влияющие на суть доклада.</p> <p><b>Решение типовых задач:</b></p> <p>– умеет определять и применять современные научные методы при решении практических задач,</p> <p>– точность ответа, принципиальные ошибки.</p> <p><b>Экзамен:</b></p> <p>– демонстрирует в основном углубленные знания базовых понятий, моделей, гипотез и концепций, свободно владеет всеми основными разделами современной физики,</p> <p>– самостоятельность, осмысленность, структурированность, логичность и аргументированность изложения материала, отсутствие затруднений в объяснении процессов и явлений, а также при формулировке собственных суждений,</p> <p>– допускает незначительные ошибки при ответах на дополнительные вопросы.</p> <p>При изложении ответа на вопрос(ы) экзаменационного билета обучающийся мог допустить незначительные неточности.</p>	<p><i>Хорошо</i></p>
<p><b>Доклады и выступления</b></p> <p>– не знает направления актуальных исследований, не составляет анализ результатов предшественников и современных достижений в области физики в применении к профессиональной области деятельности,</p>	<p><i>Удовлетворитель но</i></p>



<p>– затрудняется в постановке задач научно-исследовательской деятельности,</p> <p>– затрудняется в выборе возможных направлений профессиональной самореализации,</p> <p>- ограниченно владеет приемами планирования и оценки собственной деятельности по решению профессионально-значимых задач,</p> <p>В докладах и выступлениях обучающийся допускает неточности, влияющие на суть доклада.</p> <p><b><u>Решение типовых задач:</u></b></p> <p>– затрудняется в определении и применении современных научных методов при решении практических задач,</p> <p>– при решении задач допускает принципиальные ошибки.</p> <p><b><u>Экзамен:</u></b></p> <p>– демонстрирует общие знания базовых понятий и моделей в профессиональной области, критичных для понимания основных явлений и экспериментов, но допускает существенные ошибки по содержанию рассматриваемых (обсуждаемых) вопросов,</p> <p>– затрудняется в объяснении процессов и явлений, а также при формулировке собственных суждений,</p> <p>– допускает значительные ошибки при ответах на дополнительные вопросы.</p>	
<p><b><u>Доклады и выступления</u></b></p> <p>– отсутствие теоретического и фактического материала, подкрепленного ссылками на научную литературу и источники,</p> <p>– затрудняется в постановке задач научно-исследовательской деятельности,</p> <p>– затрудняется в выборе возможных направлений профессиональной самореализации,</p> <p>- не владеет приемами планирования и оценки собственной деятельности по решению профессионально-значимых задач,</p> <p>– неподготовленность докладов и выступлений на основе предварительного изучения литературы по темам, неучастие в коллективных обсуждениях в ходе практического (семинарского) занятия.</p> <p><b><u>Решение типовых задач:</u></b></p> <p>– затрудняется в определении и применении современных научных методов при решении практических задач,</p> <p>– при решении задач допускает многочисленные ошибки.</p> <p><b><u>Экзамен:</u></b></p> <p>– демонстрирует общие знания базовых понятий и моделей в профессиональной области, критичных для понимания основных явлений и экспериментов, но допускает существенные ошибки по содержанию рассматриваемых (обсуждаемых) вопросов,</p> <p>– затрудняется в объяснении процессов и явлений, а также при формулировке собственных суждений,</p> <p>– не отвечает на дополнительные вопросы.</p>	<p><i>Неудовлетворительно</i></p>

## Типовые контрольные задания и иные материалы, необходимые для оценки результатов освоения дисциплины (оценочные материалы)

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

### I. *Примерная тематика докладов*

1. Эксперименты в области квантовой телепортации.
2. Прогресс в области создания квантовых процессоров промежуточного масштаба
3. Наиболее перспективные применения квантовых алгоритмов

### II. *Форма и перечень вопросов экзаменационного билета.*

#### 2.1 Форма экзаменационного билета

Новосибирский государственный университет Физический факультет	
_____	
научная специальность	
_____	
направленность (профиль)	
<b>ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ №</b>	
1. Вопрос.	
2. Задача.	
3. Вопросы по изложенному аспирантом предмету его исследований.	
Составитель	И.О.Фамилия
_____	
(подпись)	
Ответственный за образовательную программу	
И.О.Фамилия	
_____	
(подпись)	
« ____ » _____ 20 г.	

#### 2.2. Перечень типовых вопросов

1. Кубиты и их состояния. Квантовые вентили. Примеры однокубитовых и двухкубитовых вентилях. Вентиль Тоффли. Изображение квантовых вентилях на схемах.
2. Простейшие квантовые алгоритмы. Генерация перепутанных состояний. Практическое применение квантовых алгоритмов.
3. Критерии диВинченцо. Физические платформы для реализации квантовых вычислений.

4. Квантовая коммуникация. Теорема о невозможности копирования квантового состояния. Квантовая криптография.
5. Квантовое описание светоделительной пластины. Детектирование состояний Белла.
6. Экспериментальная реализация сверхплотного кодирования. Анализ статистики детектирования фотонов.
7. Алгоритм квантовой телепортации. Экспериментальная реализация квантовой телепортации.
8. Квантовый параллелизм. Алгоритмы Дойча и Дойча-Йожа.
9. Квантовое преобразование Фурье.
10. Квантовый алгоритм оценки фазы. Квантовые симуляторы. Схема Китаева.
11. Алгоритм нахождения порядка числа. Алгоритм факторизации (алгоритм Шора).
12. Квантовые алгоритмы поиска. Квантовая адресация.
13. Современные средства квантового программирования.
14. Взаимодействие двухуровневых систем с переменным полем. Осцилляции Раби. Вращение кубита.
15. Реализация квантовых алгоритмов с использованием ядерного магнитного резонанса.
16. Лазерное охлаждение атомов и ионов. Квантовые процессоры на основе ионов и нейтральных атомов.
17. Сверхпроводящие кубиты. Кубиты на основе квантовых точек и азотных вакансий в алмазах.

### 2.3 Перечень типовых задач

1. Показать, каким образом с помощью последовательности однокубитовых и двухкубитовых вентилях могут быть получены все 4 перепутанных состояния Белла.
2. Показать, каким образом с помощью последовательности однокубитовых и двухкубитовых вентилях могут быть измерены все 4 перепутанных состояния Белла.
3. Объяснить алгоритм квантовой телепортации.
4. Продемонстрировать действие многокубитового алгоритма Дойча-Йожа.
5. Обосновать схему трехкубитового преобразования Фурье.
6. Продемонстрировать квантовую оценку фазы на примере однокубитового унитарного оператора.
7. Объяснить алгоритм факторизации Шора.
8. Объяснить алгоритм поиска в неупорядоченной базе данных.
9. Показать, что осцилляции Раби при взаимодействии двухуровневой системы с переменным полем могут быть использованы для реализации вращения состояний кубита.
10. Дать сравнительную характеристику основных физических платформ для квантовых вычислений.