

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова
Филиал Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова
в городе Сарове

УТВЕРЖДАЮ



Директор филиала МГУ в г. Сарове
член-корреспондент РАН В.В.Воеводин

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

Наименование дисциплины:

ЛАЗЕРЫ В КВАНТОВЫХ ВЫЧИСЛЕНИЯХ

Уровень высшего образования:

Магистратура

Направление подготовки:

03.04.02 Физика

Направленность (профиль) ОПОП:

Лазерная нелинейная оптика и фотоника

Квалификация «Магистр»

Форма обучения: Очная

Саров 2021 г.

Рабочая программа дисциплины разработана в соответствии с самостоятельно установленным МГУ образовательным стандартом (ОС МГУ) для реализуемых основных профессиональных образовательных программ высшего образования по направлению подготовки 03.04.02 Физика в редакции приказа по МГУ от 30 декабря 2020 г. №1366.

Авторы–составители:

К.ф.-м.н., доцент Владимирова Юлия Викторовна, кафедра общей физики и волновых процессов физического факультета МГУ

Аннотация к рабочей программе дисциплины

«Лазеры в квантовых вычислениях»

В курсе изучаются физические основы квантовых вычислений и квантовой теории информации. Дисциплина по выбору читается на 1м году обучения в 2 ом семестре

Рассматриваются основы квантовой механики, необходимые для изучения работы основных квантовых алгоритмов и схем. Рассматривается вопрос применения квантовых схем для задач безопасной передачи информации по квантовым каналам и разработки алгоритмов для квантовых компьютеров.

В рамках изучения современного состояния проблемы физической реализации квантового компьютера, проводится анализ основных существующих на настоящий момент способов реализации квантовых логических устройств, в том числе использующих лазерные технологии.

Разделы рабочей программы

- 1.** Место дисциплины в структуре основной профессиональной образовательной программы высшего образования (ОПОП ВО).
- 2.** Входные требования для освоения дисциплины (модуля), предварительные условия (при наличии)
- 3.** Результаты обучения по дисциплине (модулю), соотнесенные с формируемыми компетенциями
- 4.** Форма обучения.
- 5.** Язык обучения.
- 6.** Содержание дисциплины.
- 7.** Объем дисциплины
- 8.** Структурированное по темам (разделам) содержание дисциплины (модуля) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий
- 9.** Текущий контроль и промежуточная аттестация.
- 10.** Фонд оценочных средств (ФОС) для оценивания результатов обучения по дисциплине (модулю).
- 11.** Шкала оценивания.
- 12.** Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения текущего контроля успеваемости.
- 13.** Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения промежуточной аттестации.
- 14.** Материально-техническая база, информационные технологии, программное обеспечение и информационные справочные системы

1. Место дисциплины в структуре ОПОП ВО

В результате освоения дисциплины «Основы фотоники» обучающийся кроме знаний предмета получает навыки применения ранее полученных знаний для решения новых научных и практических задач.

2. Входные требования для освоения дисциплины (модуля), предварительные условия

Освоение дисциплин «Электромагнетизм», «Электродинамика», «Оптика», «Математический анализ», «Квантовая механика», «Дифференциальные уравнения», «Теория колебаний», «Теория волн».

3. Результаты обучения по дисциплине (модулю), соотнесенные с формируемыми компетенциями

В результате освоения дисциплины у обучающихся должны быть сформированы:

Формируемые компетенции (код компетенции)	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю)
Способность использовать знания современных проблем и новейших достижений в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники в своей научно-исследовательской деятельности (СПК-1)	Знать основные законы и направления современных научных исследований в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники. Уметь на основе фундаментальных знаний в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники, определять возможные направления научных исследований. Владеть необходимой информацией из современных отечественных и зарубежных источников по тематике избранного направления исследования в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники.
Способность организовать и планировать физические исследования, ставить конкретные задачи научных исследований в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники и решать их с помощью современной аппаратуры, оборудования и информационных технологий (СПК-2)	Знать базовые принципы организации научных исследований с использованием информационных технологий, основные методики работы на современном научном оборудовании в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники. Уметь используя знания в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники проводить научные исследования. Владеть навыками планирования научного исследования, анализа получаемых результатов, обобщения, оформления и публичного представления полученных результатов.
Способность определять основные направления	Знать основные направления инновационного развития в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники.

<p>внедрения научных результатов в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники (СПК-3).</p>	<p>Уметь проводить необходимый анализ современных тенденций научных инноваций в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники для подготовки предложений по внедрению полученных научных результатов.</p> <p>Владеть методами обоснования возможного применения полученных научных результатов с учетом современных достижений в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники.</p>
---	---

4. **Форма обучения:** очная

5. **Язык обучения:** русский

6. **Содержание дисциплины:**

Тема 1. Гейтовая модель квантовых вычислений

Элементарные квантовые логические вентили, однокубитные и двухкубитные вентили. Условные двухкубитные вентили, представление условных многокубитных вентилях через двухкубитные. Универсальность однокубитных вентилях и вентиля CNOT. Дискретизация однокубитных вентилях, универсальные дискретные наборы вентилях. Сложность аппроксимации произвольного унитарного преобразования.

Тема 2. Квантовый параллелизм

Понятие квантового параллелизма. Алгоритм Дойча. Алгоритм Дойча-Йожа. Экспериментальная реализация алгоритма.

Тема 3. Алгоритмы, основанные на квантовом преобразовании Фурье.

Квантовое преобразование Фурье. Алгоритм оценки фазы, оценка необходимых ресурсов, упрощенный алгоритм Китаева. Алгоритм поиска периода функции, алгоритм Шора. Квантовые алгоритмы для задач линейной алгебры.

Тема 4 Квантовые алгоритмы поиска.

Алгоритм Гровера, геометрическая иллюстрация. Оценка ресурсов. Подсчет числа решений поисковой задачи. Ускорение решения NP-полных задач. Квантовый поиск в неструктурированной базе данных. Оптимальность алгоритма Гровера.

Тема 5. Введение в квантовую коррекцию ошибок.

Коррекция ошибок при квантовых вычислениях. Эффекты декогерентности квантовых состояний и влияния окружающей среды. Модели ошибок при квантовых вычислениях. Отличия методов исправления ошибок при квантовых вычислениях от классических. Коды, исправляющие ошибки. Предельный уровень исправляемых ошибок при квантовых вычислениях.

Тема 6. Экспериментальная реализация квантовых компьютеров

Квантовые компьютеры. Физическая реализация. Квантовые компьютеры на холодный ионах, захваченных в оптическую ловушку. Квантовые компьютеры на холодных атомах, захваченных в оптическую ловушку. Реализация линейно-оптических квантовых вычислений

Тема 7. Протоколы квантовой коммуникации

Протокол сверхплотного кодирования, протокол квантовой телепортации. Протоколы квантовой криптографии. Экспериментальная реализация рассмотренных протоколов.

7. Объем дисциплины

НАЗВАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ	Трудоемкость в зачетных единицах	объем учебной нагрузки в ак. часах				
		Общая трудоемкость	в том числе ауд. занятий			Самостоятельная работа студентов
			Общая аудиторная нагрузка	Лекций	Семинаров	
Лазеры в квантовых вычислениях	2	72	34	17	17	38

8. Структурированное по темам (разделам) содержание дисциплины (модуля) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий

Изучение курса «Лазеры в квантовых вычислениях» включает в себя лекции, на которых рассматривается теоретическое содержание курса, обсуждение вопросов, обозначенных в темах дисциплины; самостоятельную работу, заключающуюся в подготовке к лекционным занятиям, выполнения домашних заданий. По вопросам, вызывающим затруднения, проводятся консультации.

№ темы	Наименование раздела дисциплины	Виды учебной нагрузки и их трудоемкость, часы					Форма текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации
		Всего часов	Лекции	Научно- практические	Семинары	Самостоятельная работа	
1	Гейтовая модель квантовых вычислений	6	2	-	1	3	Собеседование, опрос
2	Квантовый параллелизм	8	2	-	2	4	

3	Алгоритмы, основанные на квантовом преобразовании Фурье	6	1	-	2	3	
4	Квантовые алгоритмы поиска	12	3	-	3	6	
5	Введение в квантовую коррекцию ошибок	12	3	-	3	6	
6	Экспериментальная реализация квантовых компьютеров	12	3	-	3	6	
7	Протоколы квантовой коммуникации	12	3	-	3	6	
	Промежуточная аттестация	4				4	зачет в устной форме
ИТОГО:		72	17	-	17	38	

9. Текущий контроль и промежуточная аттестация.

Текущий контроль по дисциплине «Лазеры в квантовых вычислениях» осуществляется на лекциях и заключается в оценке активности слушателей, качества ответов на вопросы лектора, аргументированности позиции студента, оценивается широта используемых им теоретических знаний. В семестре в конце некоторых лекций проводятся несколько коротких контрольных работ (10 – 15 минут).

Промежуточная аттестация по дисциплине «Лазеры в квантовых вычислениях» проводится в форме экзамена. Результаты сдачи экзамена оцениваются по шкале «неудовлетворительно», «удовлетворительно», «хорошо», «отлично». Оценки «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» означают успешное прохождение промежуточной аттестации.

10. Фонд оценочных средств (ФОС) для оценивания результатов обучения по дисциплине (модулю).

Требования к структуре и содержанию фонда оценочных средств текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине

Перечень оценочных средств, применяемых на каждом этапе проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине, представлены в таблице

Наименование оценочного средства	Краткая характеристика оценочного средства	Представление оценочного средства в фонде
Оценочные средства текущего контроля		
Тематический опрос (в форме ответов на вопросы)	Средство контроля, организованное как короткий письменный ответ на поставленный вопрос по тематике предыдущей или текущей лекции, рассчитанное на выяснение объема и качества знаний, усвоенных обучающимися по определенному разделу, теме, проблеме.	Перечень тем, изучаемых в рамках дисциплины
Собеседование (в форме беседы, дискуссии по теме)	Средство контроля, организованное как свободная беседа, дискуссия по тематике изучаемой дисциплины, рассчитанное на выяснение объема знаний обучающегося по	Перечень тем, изучаемых в рамках дисциплины

	всем изученным разделам, темам; свободного использования терминологии для аргументированного выражения собственной позиции.	
Оценочные средства промежуточной аттестации		
Короткая письменная работа	Средство, позволяющее оценить сформированность систематических представлений о методах научно-исследовательской деятельности.	Перечень вопросов к экзамену

11. Шкала оценивания.

Планируемые результаты обучения	Критерии оценивания результатов обучения			
	2	3	4	5
ЗНАТЬ: принципы работы квантовых вычислительных устройств ОПК-3.Б 3-6	Отсутствие знаний принципов работы квантовых вычислительных устройств	В целом успешные, но не систематические знания принципов работы квантовых вычислительных устройств	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы знания принципов работы квантовых вычислительных устройств	Успешные и систематические знания принципов работы квантовых вычислительных устройств
УМЕТЬ: работать с квантовыми вычислительными устройствами ОПК-3.Б У-6	Отсутствие умения работать с квантовыми вычислительными устройствами	В целом успешное, но не систематическое умение работать с квантовыми вычислительными устройствами	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы умение работать с квантовыми вычислительными устройствами	Успешное и систематическое умение работать с квантовыми вычислительными устройствами
ВЛАДЕТЬ: методами описания и расчета квантовых вычислительных устройств ОПК-3.Б В-6	Отсутствие/фрагментарное владение методами описания и расчета квантовых вычислительных устройств	В целом успешное, но не систематическое владение методами описания и расчета квантовых вычислительных устройств	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы владение методами описания и расчета квантовых вычислительных устройств	Успешное и систематическое владение методами описания и расчета квантовых вычислительных устройств

12. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения текущего контроля успеваемости.

Материалы текущего контроля успеваемости обучающихся:

Пример:

1. Как отобразить произвольное состояние кубита на Bloch-сфере? Что такое операторы поворота вектора Блоха? Как экспериментально осуществляются повороты вектора Блоха?
2. Что такое запутанные состояния кубитов? Приведите квантовую схему, генерирующую ЭПР-пары (базис Белла).
3. Можно ли копировать произвольное квантовое состояние?
4. Приведите схему двухкубитового квантового компьютера, на котором решается задача Дойча при $n=1$ и опишите алгоритм решения.
5. Что такое Сырой и просеянный ключ в протоколе BB84?

13. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения промежуточной аттестации.

Материалы промежуточного контроля успеваемости обучающихся в форме экзамена:

1. Что такое кубит? В чем отличие кубита от классического бита?
2. Как отобразить произвольное состояние кубита на Bloch-сфере? Что такое операторы поворота вектора Блоха? Как экспериментально осуществляются повороты вектора Блоха?
3. Сформулируйте постулат измерения в квантовой механике. Рассмотрите пример измерения кубита.
4. В чем разница между чистым и смешанным состояниями кубита? Что такое матрица плотности кубита?
5. Что такое декогеренция кубита? На каких характерных временах она происходит?
6. Что такое квантовая схема и квантовые вычисления? Приведите примеры квантовых вентилей и квантовых схем.
7. Какие операторы нужны для реализации любого алгоритма на квантовом компьютере? Приведите примеры однокубитовых и двухкубитовых операторов.
8. Является ли набор вентилей, содержащий H, T (Адамара и $\pi/8$) и двухкубитный вентиль CZ универсальным для квантовых вычислений? Ответ обосновать.
9. Почему возможна передача информации по квантовому каналу без риска ее неконтролируемого перехвата? Ответ обосновать.
10. Как передать два бита классической информации путем передачи одного кубита? Нарисуйте квантовую схему, с помощью которой эта передача осуществляется.
11. Что такое квантовый параллелизм? В чем его отличие от классического параллелизма? Приведите квантовую схему, реализующую квантовое параллельное вычисление.
12. Можно ли копировать квантовое состояние?
13. В чем состоит суть квантовой телепортации? Объяснить на конкретном примере.
14. Что такое квантовый компьютер? Как записать различных n -разрядных целых чисел от 0 до 2^n-1 в регистре данных квантового компьютера, состоящем из n кубитов?
15. Приведите схему n -кубитового квантового компьютера, на котором решается задача Дойча при произвольном n и опишите алгоритм решения. Каково по порядку число

операций, требуемых для решения этой задачи Дойча на квантовом компьютере? Сравнить со случаем классического компьютера.

12. Как получаются экспоненциально большие выигрыши в памяти и числе операций в квантовом компьютере? Как решается проблема измерения выходного состояния в квантовых алгоритмах (на примере алгоритма Дойча)?
13. Привести пример вычисления любой сбалансированной функции.
14. Алгоритм Гровера
15. Оценка квантовой фазы и квантовое преобразование Фурье.
16. Задача на оценку собственного значения, вычисление порядка.
17. Примеры физической реализации квантовых компьютеров. (гармонический осциллятор как модель квантового компьютера, КК на оптических фотонах, на ионах в ловушке, КЭД оптических резонаторов)
18. Теорема о запрете клонирования квантовых состояний
19. Квантовое распределение ключа (КРК), принцип работы протокола КРК.
20. Протокол КРК BB84.

14. Материально-техническая база, информационные технологии, программное обеспечение и информационные справочные системы

Основная литература.

1. M.A. Nielsen, I.L. Chuang Quantum Computation and Quantum Information, 10th anniversary edition, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2010.
2. Кайе Ф., Лафлам Р., Москва М. Введение в квантовые вычисления. М.–Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, 2009. 364 с.
3. В.И.Емельянов, Ю.В.Владимирова. Квантовая физика. Биты и кубиты. М. МГУ. 2012.

Дополнительная литература.

1. Физика квантовой информации (Квантовая криптография, Квантовая Телепортация, Квант. вычисления). Сб. под редакцией Д.Боумейстера, А.Экерта, А.М. Цайлинга. — М: Постмаркет, 2002. 376 с.
2. Прескилл Дж. Квантовая информация и квантовые вычисления. Т.1. —М.–Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, 2008. 464 с.

Интернет-ресурсы.

Материально-техническое обеспечение

В соответствии с требованиями п.5.3. образовательного стандарта МГУ по направлению подготовки «Физика».

Для лекционной части курса требуются аудитория, оборудованная мультимедийным проектором, интерактивной доской, и управляющим компьютером. Также необходимо наличие экрана и обычной учебной доски.