

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
"Казанский (Приволжский) федеральный университет"
Институт физики



УТВЕРЖДАЮ
Проректор по образовательной деятельности КФУ
Проф. Д.А. Таюрский

_____» _____ 20__ г.

подписано электронно-цифровой подписью

Программа дисциплины

Физические основы квантовых компьютеров

Направление подготовки: 03.03.03 - Радиофизика

Профиль подготовки: не предусмотрено

Квалификация выпускника: бакалавр

Форма обучения: очное

Язык обучения: русский

Год начала обучения по образовательной программе: 2016

Содержание

1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю), соотнесенных с планируемыми результатами освоения ОПОП ВО
2. Место дисциплины (модуля) в структуре ОПОП ВО
3. Объем дисциплины (модуля) в зачетных единицах с указанием количества часов, выделенных на контактную работу обучающихся с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу обучающихся
4. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий
 - 4.1. Структура и тематический план контактной и самостоятельной работы по дисциплине (модулю)
 - 4.2. Содержание дисциплины (модуля)
5. Перечень учебно-методического обеспечения для самостоятельной работы обучающихся по дисциплине (модулю)
6. Фонд оценочных средств по дисциплине (модулю)
7. Перечень литературы, необходимой для освоения дисциплины (модуля)
8. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)
9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)
10. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)
11. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)
12. Средства адаптации преподавания дисциплины (модуля) к потребностям обучающихся инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья
13. Приложение №1. Фонд оценочных средств
14. Приложение №2. Перечень литературы, необходимой для освоения дисциплины (модуля)
15. Приложение №3. Перечень информационных технологий, используемых для освоения дисциплины (модуля), включая перечень программного обеспечения и информационных справочных систем

Программу дисциплины разработал(а)(и) Егоров А.В.

1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю), соотнесенных с планируемыми результатами освоения ОПОП ВО

Обучающийся, освоивший дисциплину (модуль), должен обладать следующими компетенциями:

Шифр компетенции	Расшифровка приобретаемой компетенции
ОПК-3	способностью решать стандартные задачи профессиональной деятельности на основе информационной и библиографической культуры с применением информационно-коммуникационных технологий и с учетом основных требований информационной безопасности
ПК-1	способностью понимать принципы работы и методы эксплуатации современной радиоэлектронной и оптической аппаратуры и оборудования
ПК-2	способностью использовать основные методы радиофизических измерений
ПК-3	владением компьютером на уровне опытного пользователя, применению информационных технологий

Обучающийся, освоивший дисциплину (модуль):

Должен знать:

основы нерелятивистской квантовой механики, принципы линейной алгебры, основы цифровой электроники.

Должен уметь:

записывать таблицы истинности цифровых цепей, пользоваться методом возмущений первого и второго порядка, находить собственные векторы и значения эрмитовых операторов.

Должен владеть:

основами программирования, навыками использования унитарных преобразований, методами синтеза цифровых цепей.

Должен демонстрировать способность и готовность:

решать задачи по нерелятивистской квантовой механике, использовать аппарат линейной алгебры, подвергать критическому анализу существующие прототипы квантовых компьютеров.

2. Место дисциплины (модуля) в структуре ОПОП ВО

Данная дисциплина (модуль) включена в раздел "Б1.В.ДВ.13 Дисциплины (модули)" основной профессиональной образовательной программы 03.03.03 "Радиофизика (не предусмотрено)" и относится к дисциплинам по выбору. Осваивается на 4 курсе в 7, 8 семестрах.

3. Объем дисциплины (модуля) в зачетных единицах с указанием количества часов, выделенных на контактную работу обучающихся с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу обучающихся

Общая трудоемкость дисциплины составляет 4 зачетных(ые) единиц(ы) на 144 часа(ов).

Контактная работа - 72 часа(ов), в том числе лекции - 36 часа(ов), практические занятия - 36 часа(ов), лабораторные работы - 0 часа(ов), контроль самостоятельной работы - 0 часа(ов).

Самостоятельная работа - 72 часа(ов).

Контроль (зачёт / экзамен) - 0 часа(ов).

Форма промежуточного контроля дисциплины: отсутствует в 7 семестре; зачет в 8 семестре.

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

4.1 Структура и тематический план контактной и самостоятельной работы по дисциплине (модулю)

N	Разделы дисциплины / модуля	Семестр	Виды и часы контактной работы, их трудоемкость (в часах)			Самостоятельная работа
			Лекции	Практические занятия	Лабораторные работы	
1.	Тема 1. Математический аппарат квантовой механики - линейная алгебра. Операторы и векторы. Матрицы Паули.	7	6	6	0	12
2.	Тема 2. Собственные векторы и собственные значения. Эрмитовы операторы. Тензорные произведения. Коммутаторы.	7	6	6	0	12
3.	Тема 3. Пространство состояний. Квантовые измерения. Ансамбль квантовых состояний. Свойства матрицы плотности. Состояния Белла.	7	6	6	0	12
4.	Тема 4. Представление квантовой информации. Унитарные преобразования. Квантовый компьютер на основе гармонического осциллятора.	8	6	6	0	12
5.	Тема 5. Принцип действия квантового компьютера на оптических фотонах. Квантовые вычисления и телепортация.	8	6	6	0	12
6.	Тема 6. Оптические резонаторы. Квантовые компьютеры на основе ионных ловушек и квантовых точек. ЯМР-спектрометр как квантовый компьютер.	8	6	6	0	12
	Итого		36	36	0	72

4.2 Содержание дисциплины (модуля)

Тема 1. Математический аппарат квантовой механики - линейная алгебра. Операторы и векторы. Матрицы Паули.

Уравнение Шредингера. Стационарное решение уравнения Шредингера. Аппарат линейной алгебры. Линейные операторы и векторы в гильбертовом пространстве. Волновые функции в нотации Дирака - бра и кет векторы. Базисные векторы. Преобразования базиса. Свойства унитарного преобразования. Тензорные и внутренние произведения.

Тема 2. Собственные векторы и собственные значения. Эрмитовы операторы. Тензорные произведения. Коммутаторы.

Собственные векторы и собственные значения - собственные волновые функции и энергии. Стационарные решения уравнения Шредингера. Собственные значения оператора момента. Гамильтониан. Матричные элементы операторов проекции спина. Сравнить с матрицами Паули. Коммутационные соотношения для операторов проекции спина.

Тема 3. Пространство состояний. Квантовые измерения. Ансамбль квантовых состояний. Свойства матрицы плотности. Состояния Белла.

Свойства кубита. Проблема измерения состояния кубита. Глобальный фазовый множитель. Основные квантовые вентили (гейты). X, Z, и H гейты.

Преобразование поворота. Сфера Блоха. Изображение состояний кубита на сфере Блоха. Универсальное унитарное преобразование. Двухкубитный вентиль CNOT. Перепутанные состояния.

Тема 4. Представление квантовой информации. Унитарные преобразования. Квантовый компьютер на основе гармонического осциллятора.

Свойства матрицы плотности. Соотношение между квантовой и классической информацией. Эволюция матрицы плотности. Теория возмущений, зависящих от времени. Физическая реализация квантовых компьютеров, квантовых вентилях. Представление квантовой информации. Квантовый компьютер на основе гармонического осциллятора. Инициирование исходных состояний.

Тема 5. Принцип действия квантового компьютера на оптических фотонах. Квантовые вычисления и телепортация.

Квантовая телепортация с использованием состояний Белла. Алгоритм Дойча-Джоза. Принцип действия квантового компьютера на оптических фотонах. Экспериментальная установка. Двухкубитный квантовый компьютер. Преобразование Адамара. Измерение состояния квантового регистра. Эксперименты по квантовой телепортации.

Тема 6. Оптические резонаторы. Квантовые компьютеры на основе ионных ловушек и квантовых точек. ЯМР-спектрометр как квантовый компьютер.

Квантовые алгоритмы, основанные на квантовом преобразовании Фурье. Квантовая электродинамика оптических резонаторов. Гамильтониан. Поглощение единичных фононов единичными атомами. Ионные ловушки.

Реализация 7-кубитного квантового компьютера на основе ЯМР для реализации задачи Гровера. Первые коммерческие компьютеры компании D-wave.

5. Перечень учебно-методического обеспечения для самостоятельной работы обучающихся по дисциплине (модулю)

Самостоятельная работа обучающихся выполняется по заданию и при методическом руководстве преподавателя, но без его непосредственного участия. Самостоятельная работа подразделяется на самостоятельную работу на аудиторных занятиях и на внеаудиторную самостоятельную работу. Самостоятельная работа обучающихся включает как полностью самостоятельное освоение отдельных тем (разделов) дисциплины, так и проработку тем (разделов), осваиваемых во время аудиторной работы. Во время самостоятельной работы обучающиеся читают и конспектируют учебную, научную и справочную литературу, выполняют задания, направленные на закрепление знаний и отработку умений и навыков, готовятся к текущему и промежуточному контролю по дисциплине.

Организация самостоятельной работы обучающихся регламентируется нормативными документами, учебно-методической литературой и электронными образовательными ресурсами, включая:

Порядок организации и осуществления образовательной деятельности по образовательным программам высшего образования - программам бакалавриата, программам специалитета, программам магистратуры (утвержден приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 5 апреля 2017 года №301)

Письмо Министерства образования Российской Федерации №14-55-996ин/15 от 27 ноября 2002 г. "Об активизации самостоятельной работы студентов высших учебных заведений"

Устав федерального государственного автономного образовательного учреждения "Казанский (Приволжский) федеральный университет"

Правила внутреннего распорядка федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Казанский (Приволжский) федеральный университет"

Локальные нормативные акты Казанского (Приволжского) федерального университета

6. Фонд оценочных средств по дисциплине (модулю)

Фонд оценочных средств по дисциплине (модулю) включает оценочные материалы, направленные на проверку освоения компетенций, в том числе знаний, умений и навыков. Фонд оценочных средств включает оценочные средства текущего контроля и оценочные средства промежуточной аттестации.

В фонде оценочных средств содержится следующая информация:

- соответствие компетенций планируемым результатам обучения по дисциплине (модулю);
- критерии оценивания сформированности компетенций;
- механизм формирования оценки по дисциплине (модулю);
- описание порядка применения и процедуры оценивания для каждого оценочного средства;
- критерии оценивания для каждого оценочного средства;
- содержание оценочных средств, включая требования, предъявляемые к действиям обучающихся, демонстрируемым результатам, задания различных типов.

Фонд оценочных средств по дисциплине находится в Приложении 1 к программе дисциплины (модулю).

7. Перечень литературы, необходимой для освоения дисциплины (модуля)

Освоение дисциплины (модуля) предполагает изучение основной и дополнительной учебной литературы. Литература может быть доступна обучающимся в одном из двух вариантов (либо в обоих из них):

- в электронном виде - через электронные библиотечные системы на основании заключенных КФУ договоров с правообладателями;
- в печатном виде - в Научной библиотеке им. Н.И. Лобачевского. Обучающиеся получают учебную литературу на абонементе по читательским билетам в соответствии с правилами пользования Научной библиотекой.

Электронные издания доступны дистанционно из любой точки при введении обучающимся своего логина и пароля от личного кабинета в системе "Электронный университет". При использовании печатных изданий библиотечный фонд должен быть укомплектован ими из расчета не менее 0,5 экземпляра (для обучающихся по ФГОС 3++ - не менее 0,25 экземпляра) каждого из изданий основной литературы и не менее 0,25 экземпляра дополнительной литературы на каждого обучающегося из числа лиц, одновременно осваивающих данную дисциплину.

Перечень основной и дополнительной учебной литературы, необходимой для освоения дисциплины (модуля), находится в Приложении 2 к рабочей программе дисциплины. Он подлежит обновлению при изменении условий договоров КФУ с правообладателями электронных изданий и при изменении комплектования фондов Научной библиотеки КФУ.

8. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)

О квантовых компьютерах и квантовых вычислениях - aakokin.chat.ru/qc.htm

свободная энциклопедия - ru.wikipedia.org

электронная библиотека - www.ekniga.ru

9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)

Вид работ	Методические рекомендации
лекции	Материал, излагаемый на лекциях следует конспектировать. Качество конспектов может быть учтено при начислении рейтинговых баллов. Материал лекций, включая рассмотренные примеры должен быть проработан с использованием литературы, предложенной преподавателем. При появлении вопросов, следует их сформулировать и разобрать с преподавателем на последующих занятиях.
практические занятия	На практических занятиях рекомендуется использовать два типа нотации - матрицы, векторы в виде столбцов и строк, а также бра и кет векторы. Обозначения квантовых вентиляей следует указывать в соответствии с монографией Нильсена и Чанга. При рассмотрении теорем следует использовать обозначения Дирака: бра и кет векторы.
самостоятельная работа	В самостоятельную работу входит проработка лекционного материала с использованием рекомендованной литературы, решение типовых задач, подготовка к письменной работе, компиляция реферата, подготовка к зачету. При выполнении всех разделов следует использовать как основную, так и дополнительную литературу.
зачет	При подготовке к зачету следует повторить все темы лекционного курса и решение всех задач, рассмотренных на практических задачах. Особое внимание следует уделить вопросам, которые преподаватель включил в список вопросов к зачету. Остальные темы могут быть использованы в качестве дополнительных вопросов.

10. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)

Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень программного обеспечения и информационных справочных систем, представлен в Приложении 3 к рабочей программе дисциплины (модуля).

11. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)

Материально-техническое обеспечение образовательного процесса по дисциплине (модулю) включает в себя следующие компоненты:

Помещения для самостоятельной работы обучающихся, укомплектованные специализированной мебелью (столы и стулья) и оснащенные компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет" и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду КФУ.

Учебные аудитории для контактной работы с преподавателем, укомплектованные специализированной мебелью (столы и стулья).

Компьютер и принтер для распечатки раздаточных материалов.

Мультимедийная аудитория.

12. Средства адаптации преподавания дисциплины к потребностям обучающихся инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья

При необходимости в образовательном процессе применяются следующие методы и технологии, облегчающие восприятие информации обучающимися инвалидами и лицами с ограниченными возможностями здоровья:

- создание текстовой версии любого нетекстового контента для его возможного преобразования в альтернативные формы, удобные для различных пользователей;
- создание контента, который можно представить в различных видах без потери данных или структуры, предусмотреть возможность масштабирования текста и изображений без потери качества, предусмотреть доступность управления контентом с клавиатуры;
- создание возможностей для обучающихся воспринимать одну и ту же информацию из разных источников - например, так, чтобы лица с нарушениями слуха получали информацию визуально, с нарушениями зрения - аудиально;
- применение программных средств, обеспечивающих возможность освоения навыков и умений, формируемых дисциплиной, за счёт альтернативных способов, в том числе виртуальных лабораторий и симуляционных технологий;
- применение дистанционных образовательных технологий для передачи информации, организации различных форм интерактивной контактной работы обучающегося с преподавателем, в том числе вебинаров, которые могут быть использованы для проведения виртуальных лекций с возможностью взаимодействия всех участников дистанционного обучения, проведения семинаров, выступления с докладами и защиты выполненных работ, проведения тренингов, организации коллективной работы;
- применение дистанционных образовательных технологий для организации форм текущего и промежуточного контроля;
- увеличение продолжительности сдачи обучающимся инвалидом или лицом с ограниченными возможностями здоровья форм промежуточной аттестации по отношению к установленной продолжительности их сдачи:
- продолжительности сдачи зачёта или экзамена, проводимого в письменной форме, - не более чем на 90 минут;
- продолжительности подготовки обучающегося к ответу на зачёте или экзамене, проводимом в устной форме, - не более чем на 20 минут;
- продолжительности выступления обучающегося при защите курсовой работы - не более чем на 15 минут.

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО и учебным планом по направлению 03.03.03 "Радиофизика" и профилю подготовки "не предусмотрено".

Приложение 2
к рабочей программе дисциплины (модуля)
Б1.В.ДВ.13 Физические основы квантовых компьютеров

Перечень литературы, необходимой для освоения дисциплины (модуля)

Направление подготовки: 03.03.03 - Радиофизика

Профиль подготовки: не предусмотрено

Квалификация выпускника: бакалавр

Форма обучения: очное

Язык обучения: русский

Год начала обучения по образовательной программе: 2016

Основная литература:

1. Котельников, В.А. Модельная нерелятивистская квантовая механика / В.А. Котельников. - Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2008. - 70 с. - Текст: электронный // Электронно-библиотечная система 'Лань': [сайт]. - URL: <https://e.lanbook.com/book/48251>
2. Защита информации : учеб. пособие / А.П. Жук, Е.П. Жук, О.М. Лепешкин, А.И. Тимошкин. - 3-е изд. - М.: РИОР: ИНФРА-М, 2019. - 400 с. - (Высшее образование). - Режим доступа: <http://znanium.com/catalog/product/1018901>
3. Игнатов, А.Н. Нанoeлектроника. Состояние и перспективы развития : учеб. пособие / А.Н. Игнатов. - 2-е изд., стер. - Москва : ФЛИНТА, 2017. - 360 с. - Режим доступа: <http://znanium.com/catalog/product/1032533>

Дополнительная литература:

1. Нильсен, Майкл А. Квантовые вычисления и квантовая информация : перевод с английского / М. Нильсен, И. Чанг ; Пер. под ред. М. Н. Вялого, П. М. Островского с предисл. К. А. Валиева. - Москва : Мир, 2006. - 824 с.
2. Ландау Л.Д., Теоретическая физика: Т. III. Квантовая механика (нерелятивистская теория) [Электронный ресурс]: Учеб. пособ.: Для вузов. / Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. - 5-е изд., стереот. - М. : ФИЗМАТЛИТ, 2002. - 808 с. - Режим доступа: <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN5922100572.html>
3. Душкин, Р.В. Квантовые вычисления и функциональное программирование / Р.В. Душкин. - Москва : ДМК Пресс, 2015. - 232 с. - Режим доступа: <http://znanium.com/catalog/product/1028109>

Приложение 3
к рабочей программе дисциплины (модуля)
Б1.В.ДВ.13 Физические основы квантовых компьютеров

Перечень информационных технологий, используемых для освоения дисциплины (модуля), включая перечень программного обеспечения и информационных справочных систем

Направление подготовки: 03.03.03 - Радиофизика

Профиль подготовки: не предусмотрено

Квалификация выпускника: бакалавр

Форма обучения: очное

Язык обучения: русский

Год начала обучения по образовательной программе: 2016

Освоение дисциплины (модуля) предполагает использование следующего программного обеспечения и информационно-справочных систем:

Операционная система Microsoft Windows 7 Профессиональная или Windows XP (Volume License)

Пакет офисного программного обеспечения Microsoft Office 365 или Microsoft Office Professional plus 2010

Браузер Mozilla Firefox

Браузер Google Chrome

Adobe Reader XI или Adobe Acrobat Reader DC

Kaspersky Endpoint Security для Windows

Учебно-методическая литература для данной дисциплины имеется в наличии в электронно-библиотечной системе "ZNANIUM.COM", доступ к которой предоставлен обучающимся. ЭБС "ZNANIUM.COM" содержит произведения крупнейших российских учёных, руководителей государственных органов, преподавателей ведущих вузов страны, высококвалифицированных специалистов в различных сферах бизнеса. Фонд библиотеки сформирован с учетом всех изменений образовательных стандартов и включает учебники, учебные пособия, учебно-методические комплексы, монографии, авторефераты, диссертации, энциклопедии, словари и справочники, законодательно-нормативные документы, специальные периодические издания и издания, выпускаемые издательствами вузов. В настоящее время ЭБС ZNANIUM.COM соответствует всем требованиям федеральных государственных образовательных стандартов высшего образования (ФГОС ВО) нового поколения.

Учебно-методическая литература для данной дисциплины имеется в наличии в электронно-библиотечной системе Издательства "Лань", доступ к которой предоставлен обучающимся. ЭБС Издательства "Лань" включает в себя электронные версии книг издательства "Лань" и других ведущих издательств учебной литературы, а также электронные версии периодических изданий по естественным, техническим и гуманитарным наукам. ЭБС Издательства "Лань" обеспечивает доступ к научной, учебной литературе и научным периодическим изданиям по максимальному количеству профильных направлений с соблюдением всех авторских и смежных прав.