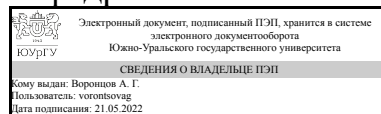


УТВЕРЖДАЮ:  
Заведующий выпускающей  
кафедрой



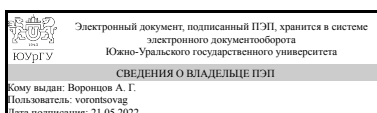
А. Г. Воронцов

## РАБОЧАЯ ПРОГРАММА

дисциплины 1.Ф.М1.06 Квантовая информация и квантовые вычисления  
для направления 11.04.04 Электроника и нанoeлектроника  
уровень Магистратура  
магистерская программа Нанoeлектроника: квантовые технологии и материалы  
форма обучения очная  
кафедра-разработчик Физика наноразмерных систем

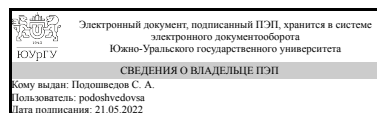
Рабочая программа составлена в соответствии с ФГОС ВО по направлению подготовки 11.04.04 Электроника и нанoeлектроника, утверждённым приказом Минобрнауки от 22.09.2017 № 959

Зав.кафедрой разработчика,  
д.физ.-мат.н., доц.



А. Г. Воронцов

Разработчик программы,  
д.физ.-мат.н., профессор



С. А. Подошведов

## 1. Цели и задачи дисциплины

Цель курса квантовой информации и квантовых вычислений - дать студентам широкое представление об основных концепциях квантовых вычислений и квантовой информации с возможностью применения студентами полученных знаний на практике. Задачи курса: 1. дать студентам расширенные знания по матричной квантовой механике 2. дать студентам представление о квантовых вычислениях и рассмотреть в деталях некоторые квантовые алгоритмы 3. дать студентам представление об энтропии Шэннона и фон Неймана как мерах классической и квантовой информации

## Краткое содержание дисциплины

Курс состоит из 16 лекций и 8 практических занятий. Лекции и практические занятия проводятся очно. Курс делится на три части. В первой части будут даны основные положения матричной квантовой механики, постулаты квантовой механики и рассмотрены основные теоремы квантовой механики. Вторая часть включает в себя детальное рассмотрение ключевых квантовых алгоритмов, включая квантовые алгоритмы Гровера и Шора. Третья часть курса содержит информацию об квантовой информации и мерах ее измерения.

## 2. Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины

| Планируемые результаты освоения ОП ВО (компетенции)   | Планируемые результаты обучения по дисциплине  |
|---|--|
| ПК-1 Готов формулировать цели и задачи научных исследований в соответствии с тенденциями и перспективами развития электроники и нанoeлектроники, а также смежных областей науки и техники, способностью обоснованно выбирать теоретические и экспериментальные методы и средства решения сформулированных задач | Знает: Основные законы и методы квантовой информатики, теорию построения квантовых алгоритмов, теорию работы квантового компьютера<br>Умеет: Использовать методы квантовой информатики<br>Имеет практический опыт: Определения применимости известных методов квантового компьютеринга для решения поставленной задачи |

## 3. Место дисциплины в структуре ОП ВО

| Перечень предшествующих дисциплин, видов работ учебного плана          | Перечень последующих дисциплин, видов работ                   |
|--|---|
| Производственная практика, научно-исследовательская работа (1 семестр) | Производственная практика, преддипломная практика (4 семестр) |

Требования к «входным» знаниям, умениям, навыкам студента, необходимым при освоении данной дисциплины и приобретенным в результате освоения предшествующих дисциплин:

| Дисциплина   | Требования   |
|--|--|
| Производственная практика, научно-исследовательская работа (1 семестр) | Знает: Основные понятия области своих научных интересов<br>Умеет: Критически читать литературные источники по тематике своих |

научных интересов Имеет практический опыт:  
Формулирования цели и задач дипломного  
исследования, написания литературного обзора

#### 4. Объём и виды учебной работы

Общая трудоёмкость дисциплины составляет 3 з.е., 108 ч., 54,25 ч.  
контактной работы

| Вид учебной работы   | Всего часов | Распределение по семестрам в часах |  |
|--|-------------|------------------------------------|--|
|  |             | Номер семестра                     |  |
|  |             | 3                                  |  |
| Общая трудоёмкость дисциплины  | 108         | 108                                |  |
| <i>Аудиторные занятия:</i>   | 48          | 48                                 |  |
| Лекции (Л)   | 32          | 32                                 |  |
| Практические занятия, семинары и (или) другие виды аудиторных занятий (ПЗ) | 16          | 16                                 |  |
| Лабораторные работы (ЛР)   | 0           | 0                                  |  |
| <i>Самостоятельная работа (СРС)</i>  | 53,75       | 53,75                              |  |
| с применением дистанционных образовательных технологий                     | 0           |                                    |  |
| Подготовка к докладу   | 16          | 16                                 |  |
| Подготовка к зачету  | 4           | 4                                  |  |
| Самостоятельное изучение глав книги  | 33,75       | 33,75                              |  |
| Консультации и промежуточная аттестация                                    | 6,25        | 6,25                               |  |
| Вид контроля (зачет, диф.зачет, экзамен)                                   | -           | зачет                              |  |

#### 5. Содержание дисциплины

| № раздела | Наименование разделов дисциплины                     | Объём аудиторных занятий по видам в часах |    |    |    |
|-----------|--|---|----|----|----|
|           |  | Всего                                     | Л  | ПЗ | ЛР |
| 1         | Введение в математический аппарат квантовой механики | 14  | 6  | 8  | 0  |
| 2         | Квантовые вычисления                                 | 28  | 22 | 6  | 0  |
| 3         | Квантовая информация                                 | 6   | 4  | 2  | 0  |

##### 5.1. Лекции

| № лекции | № раздела | Наименование или краткое содержание лекционного занятия   | Кол-во часов |
|----------|-----------|---|--------------|
| 1        | 1         | Линейная алгебра, линейные операторы и матрицы, Гильбертово пространство. На лекции вводятся основные обозначения, используемые в квантовой механике. Вводится понятие векторного пространства и основные операции, которые могут быть использованы над векторами. Вводится понятие линейной независимости векторов и базиса. Рассматривается действие оператора на векторы. Вводится понятие скалярного произведения векторов и конечномерного Гильбертова пространства. Будут рассмотрены | 2            |

|    |   |  |   |
|----|---|--|---|
|    |   | понятия собственного вектора и собственного значения операторов. Вводятся понятия сопряженных и эрмитовых операторов, а также унитарного и положительного операторов. Вводится понятие тензорного произведения Гильбертовых пространств  |   |
| 2  | 1 | Основные теоремы и постулаты квантовой механики. Будут рассмотрены теорема о спектральном разложении, неравенство Коши-Шварца в терминах квантовых состояний, разложение Шмидта, некоммутирующие операторы и неравенство Гейзенберга. Будут рассмотрены и объяснены три постулата квантовой механики, на базе которых развивается квантовая математика.  | 2 |
| 3  | 1 | Матрица плотности. Реализация унитарных преобразований на сфере Блоха. Будет введено понятие матрицы плотности и действия над ними. Будет введено понятие квантового кубита и подробно рассмотрена структура унитарных операций (одно-кубитовые вращения) на сфере Блоха, а также структура матриц плотности кубита и преобразования матрицы плотности при унитарных преобразованиях.  | 2 |
| 4  | 2 | Общие свойства квантовых вычислений и графическое представление унитарных операторов и операторов измерения. Общая схема работы квантового компьютера. Будут введены элементарные операции: матрицы Паули, матрица Адамара, матрицы однокубитовых преобразований, матрицы контролируемого- $X$ , матрицы контролируемого- $Z$ , преобразование Тоффли  | 2 |
| 5  | 2 | Проблема Дойча и квантовое решение проблемы Дойча Будет представлена сама проблема и алгоритм решения данной проблемы с помощью квантового алгоритма Дойча как аналитический, так и графический. Будет показано увеличение скорости квантового алгоритма в два раза по сравнению с классическим перебором. Будет рассмотрен общий случай квантовых алгоритмов с запутыванием вспомогательных состояний.  | 2 |
| 6  | 2 | Квантовый алгоритм Бернштейна-Вазирани. Будет рассмотрена теория алгоритма Бернштейна-Вазирани. Будет представлено как теоретическое, так и графические решения квантового алгоритма Бернштейна-Вазирани и показана увеличение скорости квантового алгоритма.  | 2 |
| 7  | 2 | Проблема Симони по нахождению периода функции при сложении аргументов функции по модулю 2. Будет представлено решение проблемы Симони с использованием квантового компьютера. Будет показано преимущество квантового алгоритма над классическим по скорости и оценена нижняя граница вероятности успеха квантового алгоритма Симони.   | 2 |
| 8  | 2 | Квантовые протоколы. Будет проведен обзор по современным квантовым протоколам отличным от квантовых вычислений. Будет рассмотрен протокол квантовой телепортации неизвестного кубита, квантовый протокол плотного кодирования.   | 2 |
| 9  | 2 | Алгоритм Гровера. Быстрый поиск нужного элемента из изначально неотсортированного списка элементов. Будет рассмотрена постановка проблемы и итерации Гровера реализуемые на квантовом компьютере, которые позволяют сократить время по поиску требуемого элемента. Будет показано, что алгоритм Гровера позволяет найти нужный элемент с вероятностью близкой к единице со скоростью в корень из $N$ , где $N$ - это число элементов в списке, быстрее чем на классическом компьютере. | 2 |
| 10 | 2 | Продолжение алгоритма Гровера. Будет показано как построить основные операторы для реализации квантового алгоритма Гровера.  | 2 |
| 11 | 2 | Введение в теорию чисел. Алгоритм кодирования информации RSA. Будет представлено краткое введение в теорию чисел, введено понятие периода функции по модулю простого числа. Будет представлено описание RSA алгоритма для кодирования информации, основанного на факторизации очень большого числа по простым множителям.  | 2 |
| 12 | 2 | Введение в квантовое Фурье-преобразование. Будет введена ключевая  | 2 |

|    |   |   |   |
|----|---|---|---|
|    |   | унитарная операция алгоритма Шора: квантовое Фурье-преобразование. Будет показана реализация Фурье-преобразования на небольшом числе кубитов.   |   |
| 13 | 2 | Квантовый алгоритм Шора по быстрой факторизации больших чисел и взламывание RSA протокола. Будет показано как найти период числа по модулю большого числа, являющегося произведением двух простых чисел с помощью квантового Фурье-преобразования. Будет проведена оценка вероятности успеха найти период и тем самым взломать RSA код. Окончательно, будут представлены поэтапные шаги алгоритма Шора по взламыванию информации, закодированной посредством RSA алгоритма. | 2 |
| 14 | 2 | Протоколы квантовой криптографии. Будут показаны протоколы квантовой криптографии: BB-84, B-92. Будут показаны некоторые попытки недоброжелателей проникнуть в квантовый канал связи и то как данное проникновение может быть обнаружено.   | 2 |
| 15 | 3 | Классическая информация. Энтропия Шэннона. Основные свойства энтропии Шэннона. Будет введена ключевая концепция всей теории информации, а именно, понятие энтропии Шэннона как мера информации в битах. Будут рассмотрены основные свойства энтропии Шэннона, некоторые из которых будут доказаны. Будет введено понятие относительной энтропии, обусловленной энтропии, а также взаимной информации.   | 2 |
| 16 | 3 | Энтропия фон Неймана. Теорема Холево. Будет введена концепция квантовой информации - энтропия фон Неймана. Введены понятия относительной энтропии Неймана, обусловленной энтропии и взаимной информации двух квантовых систем. Будут разобраны свойства энтропии фон Неймана. Будет доказана теорема Холево о верхней границе взаимной информации двух квантовых систем.  | 2 |

## 5.2. Практические занятия, семинары

| № занятия | № раздела | Наименование или краткое содержание практического занятия, семинара   | Кол-во часов |
|-----------|-----------|---|--------------|
| 1         | 1         | Линейная алгебра, линейные операторы и матрицы, Гильбертово пространство. Решение задач с векторами, поиск собственных векторов и собственных значений матриц Паули.  | 2            |
| 2         | 1         | Основные свойства унитарных операторов используемых в квантовой обработке информации. Вывод основных соотношений между операторами X,Z, оператора Адамара, оператора контролируемого-X и контролируемого-Z. | 2            |
| 3         | 1         | Графическая реализация операторов. Будут предложены задачи на графическую реализацию последовательностей унитарных операторов.  | 2            |
| 4         | 1         | Одно-кубитные унитарные операции и связанные с ними вращения на сфере Блоха. Будут рассмотрены задачи на различные типы вращений и связанные с ними унитарные преобразования.                               | 2            |
| 5         | 2         | Графическое решение проблемы Бернштейна-Вазирани. Будут предложены задачи по реализации квантового алгоритма Бернштейна-Вазирани с различными значениями неизвестного параметра, который необходимо найти.  | 2            |
| 6         | 2         | Рассмотрение и обсуждение рефератов студентов на предложенные темы первой трети группы. Будут рассмотрены рефераты студентов и предложены вопросы, на которые они должны будут ответить.                    | 2            |
| 7         | 2         | Рассмотрение и обсуждение рефератов студентов на предложенные темы второй трети группы. Будут рассмотрены рефераты студентов и предложены вопросы, на которые они должны будут ответить.                    | 2            |

|   |   |   |   |
|---|---|---|---|
| 8 | 3 | Рассмотрение и обсуждение рефератов студентов на предложенные темы последней трети группы. Будут рассмотрены рефераты студентов и предложены вопросы, на которые они должны будут ответить. | 2 |
|---|---|---|---|

### 5.3. Лабораторные работы

Не предусмотрены

### 5.4. Самостоятельная работа студента

| Выполнение СРС                      |   |         |              |
|-------------------------------------|---|---------|--------------|
| Подвид СРС                          | Список литературы (с указанием разделов, глав, страниц) / ссылка на ресурс  | Семестр | Кол-во часов |
| Подготовка к докладу                | Студенту предлагается сделать общий обзор по теме доклада или перевести научную статью по теме доклада на защите. С каждым студентом будет проведена беседа и рекомендована научная статья или обзорная по теме по теме реферата. | 3       | 16           |
| Подготовка к зачету                 | Ф. Кайе, Р. Лафлам, М. Моска "Введение в квантовые вычисления" - главы 1-3 страницы 6-77; главы 4,5 страницы 78-108; глава 6 страницы 109-138   | 3       | 4            |
| Самостоятельное изучение глав книги | Ф. Кайе, Р. Лафлам, М. Моска "Введение в квантовые вычисления" - Москва ; Ин-т компьютерных исслед. ; Ижевск : R & C dynamics, 2009. - 346 с.   | 3       | 33,75        |

## 6. Фонд оценочных средств для проведения текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации

Контроль качества освоения образовательной программы осуществляется в соответствии с Положением о балльно-рейтинговой системе оценивания результатов учебной деятельности обучающихся.

### 6.1. Контрольные мероприятия (КМ)

| № КМ | Се-местр | Вид контроля             | Название контрольного мероприятия | Вес | Макс. балл | Порядок начисления баллов  | Учитывается в ПА |
|------|----------|--------------------------|-----------------------------------|-----|------------|--|------------------|
| 1    | 3        | Промежуточная аттестация | Защита рефератов                  | -   | 40         | 1. 5 баллов начисляется за правильное оформление реферата;<br>2. 5 баллов начисляется за присутствие списка литературы с не менее чем 8 ссылками;<br>3. 5 баллов начисляются за присутствие графического материала в виде графиков, схем и чертежей; | зачет            |

|   |   |                  |  |    |    |   |       |
|---|---|------------------|--|----|----|---|-------|
|   |   |                  |  |    |    | 4. 15 баллов начисляется за полное раскрытие темы реферата;<br>5. 5 баллов начисляются за соответствие выводов материалу работы;<br>6. 5 баллов начисляются за вывод одной теоремы.<br>Если доклад студента отвечает данным требованиям, то студент получает максимальное количество баллов 40. |       |
| 2 | 3 | Текущий контроль | Ответ на короткий теоретический вопрос у доски на практике | 10 | 10 | Один правильный ответ дает студенту - 2 балла. Всем студентам будет предоставлена возможность ответить на вопрос на практическом занятии.   | зачет |
| 3 | 3 | Текущий контроль | Контрольная работа 1                                       | 20 | 20 | Решение задач, в работе 3 задачи: первая задача 3 - балла, вторая - 7 баллов, третья - 10 баллов. Решение задач проверяет самостоятельную работу студента по изучению Ф. Кайе, Р. Лафлам, М. Моска "Введение в квантовые вычисления" - 2009. - 346 с.   | зачет |
| 4 | 3 | Текущий контроль | Контрольная работа 2                                       | 30 | 30 | Решение задач, в работе 3 задачи: первая задача 6 баллов, вторая - 9 баллов, третья - 15 баллов. Решение задач проверяет самостоятельную работу студента по изучению Ф. Кайе, Р. Лафлам, М. Моска "Введение в квантовые вычисления" - 2009. - 346 с.  | зачет |

## 6.2. Процедура проведения, критерии оценивания

| Вид промежуточной аттестации | Процедура проведения   | Критерии оценивания                     |
|------------------------------|--|---|
| зачет                        | Промежуточная аттестация может быть выставлена по результатам текущего контроля. Студент может повысить свой рейтинг, выполнив контрольное мероприятие промежуточной аттестации, которое проводится в форме защиты рефератов по заранее выданным темам. Студенту на защиту реферата предоставлено 20 минут. Студент может или прочитать свой реферат, или своими словами пересказать содержание реферата. Студент может пользоваться дополнительной литературой в процессе защиты. | В соответствии с пп. 2.5, 2.6 Положения |

## 6.3. Паспорт фонда оценочных средств

| Компетенции | Результаты обучения  | № КМ |   |   |   |
|-------------|--|------|---|---|---|
|             |  | 1    | 2 | 3 | 4 |
| ПК-1        | Знает: Основные законы и методы квантовой информатики, теорию построения квантовых алгоритмов, теорию работы квантового компьютера | +    |   |   |   |
| ПК-1        | Умеет: Использовать методы квантовой информатики   |      | + |   | + |
| ПК-1        | Имеет практический опыт: Определения применимости известных методов квантового компьютеринга для решения поставленной задачи       |      |   | + | + |

Типовые контрольные задания по каждому мероприятию находятся в приложениях.

## 7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

### Печатная учебно-методическая документация

а) основная литература:

Не предусмотрена

б) дополнительная литература:

Не предусмотрена

в) отечественные и зарубежные журналы по дисциплине, имеющиеся в библиотеке:

Не предусмотрены

г) методические указания для студентов по освоению дисциплины:

1. Кулик С.Д., Берков А.В., Яковлев В.П. Введение в теорию квантовых вычислений (методы квантовой механики в кибернетике): учебное пособие.— В 2 кн.— Кн. 1. — М.: МИФИ, 2008.—212 с.

из них: учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студента:

### Электронная учебно-методическая документация

| № | Вид литературы            | Наименование ресурса в электронной форме          | Библиографическое описание  |
|---|---------------------------|---|---|
| 1 | Основная литература       | Электронно-библиотечная система издательства Лань | Ильичев, И. В. Элементарные основы квантовых вычислений. Упражнения и задачи : учебное пособие / И. В. Ильичев. — Новосибирск : НГТУ, 2014. — 28 с. — ISBN 978-5-7782-2414-8. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <a href="https://e.lanbook.com/book/118442">https://e.lanbook.com/book/118442</a> (дата обращения: 01.11.2021). — Режим доступа: для авториз. пользователей.              |
| 2 | Дополнительная литература | Электронно-библиотечная система издательства Лань | Прилипко, В. К. Физические основы квантовых вычислений. Динамика кубита : монография / В. К. Прилипко, И. И. Коваленко. — Санкт-Петербург : Лань, 2019. — 216 с. — ISBN 978-5-8114-3383-4. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <a href="https://e.lanbook.com/book/111888">https://e.lanbook.com/book/111888</a> (дата обращения: 01.11.2021). — Режим доступа: для авториз. пользователей. |

Перечень используемого программного обеспечения:

Нет

Перечень используемых профессиональных баз данных и информационных справочных систем:

Нет



## 8. Материально-техническое обеспечение дисциплины

| Вид занятий                     | № ауд.      | Основное оборудование, стенды, макеты, компьютерная техника, предустановленное программное обеспечение, используемое для различных видов занятий |
|---------------------------------|-------------|--|
| Практические занятия и семинары | 305<br>(16) | Демонстрационное оборудование: меловая доска.  |
| Лекции                          | 305<br>(16) | Компьютерное оборудование для показа презентаций: системный блок, монитор, проектор, экран.  |