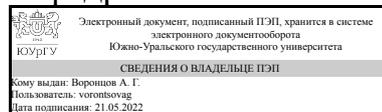


УТВЕРЖДАЮ:
Заведующий выпускающей
кафедрой



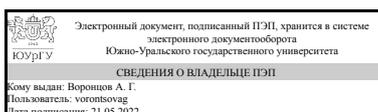
А. Г. Воронцов

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА

дисциплины 1.Ф.М1.04 Физика наноразмерных систем
для направления 11.04.04 Электроника и наноэлектроника
уровень Магистратура
магистерская программа Наноэлектроника: квантовые технологии и материалы
форма обучения очная
кафедра-разработчик Физика наноразмерных систем

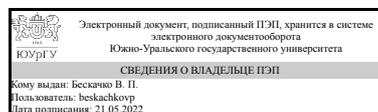
Рабочая программа составлена в соответствии с ФГОС ВО по направлению подготовки 11.04.04 Электроника и наноэлектроника, утверждённым приказом Минобрнауки от 22.09.2017 № 959

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



А. Г. Воронцов

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



В. П. Бескачко

1. Цели и задачи дисциплины

Цель дисциплины - изучение принципов описания свойств наноразмерных систем как базовых элементов современной и будущей наноэлектроники. Задачи: 1. Изучить теоретические основы методов расчета малых систем, где существенными становятся квантовые размерные эффекты. 2. Рассмотреть модели таких систем в одном, двух и трех измерениях (квантовые ямы, нити и точки). 3. Познакомиться с методами расчета переноса заряда в простейшем (одномерном) случае.

Краткое содержание дисциплины

Дисциплина "Физика наноразмерных систем" изучается в течение одного семестра. Ее присутствие объясняется тем, что электроника является первым из видов человеческой деятельности, который в прошедшем десятилетии перешагнул нанометровый рубеж в размерах создаваемых объектов. Действие закона Мура, обеспечившее невиданный прогресс в электронике в последние полвека, заканчивается или даже уже закончилось. Электроника пришла к состоянию, когда в основу работы электронных устройств должны быть положены новые физические принципы. Эти принципы - принципы квантовой механики. Стоящие на пороге электроники новые технологии - это квантовые технологии. Поэтому задача создания электронных устройств нанометрового масштаба есть задача прикладной квантовой механики. Курс состоит из трех частей. В первой углубляются знания студентов в области квантовой физики до уровня, позволяющего делать расчеты простейших квантовых систем и понимать, о чем идет речь в современных публикациях об инновациях в наноэлектронике. Во второй части рассчитываются и анализируются свойства базовых квантовых систем в их стационарных состояниях. В заключительной части рассматриваются квантовые механизмы переноса заряда в наносистемах и методы его описания.

2. Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины

Планируемые результаты освоения ОП ВО (компетенции)	Планируемые результаты обучения по дисциплине
ПК-2 Способен разрабатывать эффективные алгоритмы решения сформулированных задач с использованием современных языков программирования и обеспечивать их программную реализацию	Знает: Основные физические законы и принципы функционирования наноразмерных систем Умеет: Решать практические задачи с использованием методов квантовомеханического описания простейших квантовых систем, входящих в состав элементов электроники и наноэлектроники

3. Место дисциплины в структуре ОП ВО

Перечень предшествующих дисциплин, видов работ учебного плана	Перечень последующих дисциплин, видов работ
Квазиклассические модели электронных устройств, Атомистическое моделирование материалов наноэлектроники	Не предусмотрены

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

Дисциплина	Требования
Атомистическое моделирование материалов наноэлектроники	Знает: Современные методы моделирования структуры и свойств материалов Умеет: Использовать современные программные пакеты для моделирования свойств интересующих материалов Имеет практический опыт: Применения современных методов моделирования для решения конкретных практических задач
Квазиклассические модели электронных устройств	Знает: Принципы построения квазиклассических моделей электронных устройств; условия применимости таких моделей Умеет: Строить квазиклассические модели устройств Имеет практический опыт: Программной реализации моделей

4. Объём и виды учебной работы

Общая трудоёмкость дисциплины составляет 3 з.е., 108 ч., 72,5 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>	64	64	
Лекции (Л)	16	16	
Практические занятия, семинары и (или) другие виды аудиторных занятий (ПЗ)	48	48	
Лабораторные работы (ЛР)	0	0	
<i>Самостоятельная работа (СРС)</i>	35,5	35,5	
с применением дистанционных образовательных технологий	0		
Подготовка к экзамену	10,5	10,5	
Освоение теоретического материала дисциплины	15	15	
Подготовка к практическим занятиям и выполнение домашних заданий	10	10	
Консультации и промежуточная аттестация	8,5	8,5	
Вид контроля (зачет, диф.зачет, экзамен)	-	экзамен	

5. Содержание дисциплины

№ раздела	Наименование разделов дисциплины	Объем аудиторных занятий по видам в часах			
		Всего	Л	ПЗ	ЛР

1	Принципы квантовомеханического описания состояний и движений микросистем	22	6	16	0
2	Простые 1D, 2D и 3D модели пространственно ограниченных квантовых систем	21	5	16	0
3	Электронный перенос в одном измерении	21	5	16	0

5.1. Лекции

№ лекции	№ раздела	Наименование или краткое содержание лекционного занятия	Кол-во часов
1	1	Квантовые эффекты в наноразмерных системах. Классические и квантовые наблюдаемые, специфика квантовых измерений. Вероятность и амплитуда вероятности исхода эксперимента. Состояние квантовой системы. Линейные, унитарные и гильбертовы пространства. Функциональная и матричная реализация гильбертовых пространств.	2
2	1	Линейные операторы в гильбертовых пространствах. Алгебра линейных операторов. Оператор, эрмитово сопряженный к данному. Самосопряженные (эрмитовы) операторы. Задача на собственные значения для эрмитовых операторов, свойства собственных значений и собственных векторов. Эрмитовы операторы в L ² -реализации гильбертова пространства. Фундаментальные операторы квантовой механики. Оператор кинетической и потенциальной энергии, гамильтониан.	2
3	1	Основные аксиомы квантовой механики: аксиома состояний, аксиома наблюдаемых, аксиома о статистической интерпретации. Принцип соответствия. Квантовая динамика. Гейзенберговская и шредингеровская картины квантовой динамики. Нестационарное уравнение Шредингера. Решение уравнения Шредингера для консервативных систем. Стационарные состояния квантовых систем.	2
1	2	Размерное квантование. Системы, пространственно ограниченные в одном, двух и трех измерениях бесконечно высокими потенциальными барьерами. Состояния и плотность состояний.	2
2	2	Задача о линейном гармоническом осцилляторе.	1
3	2	Частица в потенциальной яме конечной глубины (одномерный случай). Прямоугольная и треугольная потенциальные ямы.	2
1	3	Рассеяние частиц на потенциальном барьере. Метод трансфер-матрицы.	3
2	3	Матрица рассеяния. Метод согласования мод.	2

5.2. Практические занятия, семинары

№ занятия	№ раздела	Наименование или краткое содержание практического занятия, семинара	Кол-во часов
1	1	Аксиомы линейного пространства (ЛП). Характеризация множеств как ЛП. Линейная зависимость и независимость элементов ЛП. Размерность и базис ЛП. Смена базиса. Аксиомы эрмитова скалярного произведения. Норма вектора и метрика пространства. Унитарные пространства. Ортонормированные (декартовы) базисы. Процедура ортогонализации Грамма-Шмидта.	2
2	1	Аксиомы гильбертова пространства (ГП). Сходимость последовательности элементов в ГП. Метрическая полнота. Сепарабельность. Функциональная L ² (Ω) реализация ГП. Декартовы базисы в случае $\dim\Omega=1$: $\Omega=[0,a]$ и $\Omega=\mathbb{R}$. Тригонометрические и обобщенные ряды Фурье. Полиномы Эрмита. Случай	2

		$\dim\Omega > 1$, примеры базисов, многомерные ряды Фурье. l2-реализация ГП. l2-реализация ГП как следствие $L_2(\Omega)$ -реализации ГП.	
3	1	Линейные операторы в ГП. Сопряженные и самосопряженные операторы. Унитарные операторы. Задачи на собственные значения (СЗ) для линейных операторов в ГП. Свойства СЗ и собственных векторов (СВ) эрмитовых операторов. Обобщенная ортогональность и свойства δ -функции Дирака. Линейные операторы в $L_2(\Omega)$.	3
4	1	Фундаментальные операторы КМ - операторы координаты и импульса, их свойства. Операторы Гамильтона (Г). Задачи на СЗ для оператора Г. Интеграл Фурье. Прямое и обратное преобразование Фурье. Координатное и импульсное представления в КМ.	2
5	1	Основные положения (аксиомы) квантовой механики. Основные теоремы о средних значениях наблюдаемых. Полные наборы коммутирующих наблюдаемых. Соотношение неопределенностей. Универсальная алгебра наблюдаемых (алгебра Ли). Дираковский принцип соответствия. Явный вид основных наблюдаемых КМ.	3
6	1	Квантовая динамика, картина Гейзенберга. Задача о линейном гармоническом осцилляторе. Теорема Эренфеста: контрпример - ангармонический осциллятор.	2
7	1	Квантовая динамика, картина Шредингера. Уравнение Шредингера (УШ). Стационарное УШ. Пример: свободная частица.	2
1	2	Квантовые размерные эффекты. Состояния частиц в областях, пространственно ограниченных в одном, двух и трех измерениях. Расчет плотности состояний.	4
2	2	Состояния частиц в потенциальных ямах конечной глубины - прямоугольная и треугольная потенциальные ямы.	4
3	2	Задача о линейном гармоническом осцилляторе - координатное и импульсное представления.	4
4	2	Квантовая динамика: задача о свободной частице в картинах Гейзенберга и Шредингера.	4
1	3	Уравнение непрерывности. Плотность тока частиц. Рассеяние частиц на потенциальных барьерах - прямоугольный барьер.	4
2	3	Одномерный перенос заряда. Теория Ландауэра. Квант проводимости.	4
3	3	Рассеяние на барьерах произвольной формы. Метод трансфер-матрицы.	4
4	3	Рассеяние частиц на барьерах. Матрица рассеяния.	4

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 экзамену	Савельев И. В. Основы теоретической физики. Том 2. Квантовая механика (2021). Глава 1, п. 1-3, с. 7-13; глава 2, п. 7-14, с. 25-71; глава 3, п. 15-18, с. 72-89. Давыдов С. Ю., Лебедев А. А., Посредник О. В. Элементарное введение в теорию наносистем (2021). Часть 1, глава 1, п.	3	10,5

	1.1-1.8, с. 6-33; Часть 2, глава 4, п. 4.1-4.3, с. 72-85; глава 5, п. 5.1-5.4, с. 88-108. Давыдов С. Ю., Лебедев А. А., Посредник О. В. Элементарное введение в теорию наносистем (2021). Глава 1, с.36; глава 4, с. 86-87; глава 5, с. 109-110. Иродов И. Е. Задачи по квантовой физике (2020). Глава 2, с. 26-42; глава 3, с. 43-54, глава 6, с. 81-94		
Освоение теоретического материала дисциплины	Савельев И. В. Основы теоретической физики. Том 2. Квантовая механика (2021). Глава 1, п. 1-3, с. 7-13; глава 2, п. 7-14, с. 25-71; глава 3, п. 15-18, с. 72-89. Давыдов С. Ю., Лебедев А. А., Посредник О. В. Элементарное введение в теорию наносистем (2021). Часть 1, глава 1, п. 1.1-1.8, с. 6-33; Часть 2, глава 4, п. 4.1-4.3, с. 72-85; глава 5, п. 5.1-5.4, с. 88-108.	3	15
Подготовка к практическим занятиям и выполнение домашних заданий	Давыдов С. Ю., Лебедев А. А., Посредник О. В. Элементарное введение в теорию наносистем (2021). Глава 1, с.36; глава 4, с. 86-87; глава 5, с. 109-110. Иродов И. Е. Задачи по квантовой физике (2020). Глава 2, с. 26-42; глава 3, с. 43-54, глава 6, с. 81-94	3	10

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	Текущий контроль	Коллоквиум 1	1	50	Коллоквиум 1 контролирует подготовку студентов по первому разделу курса - квантовомеханические основы описания наноразмерных систем. Коллоквиум проводится во время практических занятий в письменной форме, продолжительность 20-30 минут. Студентам предлагается 5 заданий, в трех из которых проверяется знание основных представлений, понятий и величин, фигурирующих в курсе, а два оставшихся задания содержат по одной задаче, где нужно продемонстрировать умение оперировать с упомянутыми выше объектами. Задание оценивается в 10 баллов, если ответ 1) правильный, 2)	экзамен

						полный, 3) грамотно изложен и 4) аккуратно оформлен. Ответ неправильный или отсутствует - 0 баллов. Нарушение условий 3) или 4) влечет уменьшение оценки на 2 балла за каждое из них. При нарушении условия 2) преподаватель оценивает, какая часть ответа отсутствует и пропорционально уменьшает максимальную оценку за задание (10 баллов). Оценки за все задания суммируются и дают итоговую оценку за коллоквиум в целом.	
2	3	Текущий контроль	Контрольная работа 1	4	10	Контрольная работа 1 контролирует умение студентов выполнять исследования моделей наноразмерных систем, обсуждаемых во втором разделе курса - "Простые 1D, 2D и 3D модели пространственно ограниченных квантовых систем". Контрольная проводится во время практических занятий в письменной форме, продолжительность 45 минут. Студентам предлагается 1 задача, при решении которой они должны продемонстрировать владение основными положениями квантовой механики, методами решения возникающих математических задач и умение правильно интерпретировать результаты расчетов. Работа оценивается в 10 баллов, если решение 1) правильное, 2) полное (содержит ответы на все поставленные в задаче вопросы), 3) изложено в логической последовательности с необходимыми пояснениями, 4) грамотно изложено и 5) аккуратно оформлено. Все ответы неправильные или отсутствуют - 0 баллов. Нарушение условий 3), 4) или 5) влечет уменьшение оценки на 2 балла за каждое из них. При нарушении условия 2) преподаватель оценивает, какая часть решения отсутствует и пропорционально уменьшает максимальную оценку за задание (10 баллов).	экзамен
3	3	Текущий контроль	Контрольная работа 2	4	10	Проводится письменно, во время практических занятий, длительность 45 мин. Порядок начисления баллов такой же, как и при выполнении контрольной работы 1.	экзамен
4	3	Промежуточная аттестация	Экзамен	-	30	Экзаменационный билет содержит 3 задания, по одному на каждый раздел курса. Максимальный балл за каждое задание равен 10. Первое задание - вопрос по теории. Оно оценивается также, как оценивается задание в коллоквиуме. Два следующих задания - задачи по разделам 2 и 3. Они оцениваются по тем же правилам, что и задачи в контрольных работах 1 и 2.	экзамен

6.2. Процедура проведения, критерии оценивания

Вид промежуточной аттестации	Процедура проведения	Критерии оценивания
экзамен	Прохождение контрольного мероприятия промежуточной аттестации не является обязательным. Контрольное мероприятие промежуточной аттестации проводится в форме письменного экзамена. На выполнение отводится 90 минут. Билет содержит один теоретический вопрос и две задачи. При прохождении контрольного мероприятия промежуточной аттестации запрещается пользоваться любыми источниками информации.	В соответствии с пп. 2.5, 2.6 Положения

6.3. Паспорт фонда оценочных средств

Компетенции	Результаты обучения	№ КМ			
		1	2	3	4
ПК-2	Знает: Основные физические законы и принципы функционирования наноразмерных систем	+	+		+
ПК-2	Умеет: Решать практические задачи с использованием методов квантовомеханического описания простейших квантовых систем, входящих в состав элементов электроники и нанoeлектроники	+	+	+	+

Типовые контрольные задания по каждому мероприятию находятся в приложениях.

7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

Печатная учебно-методическая документация

а) основная литература:

- Иродов, И. Е. Задачи по квантовой физике Учеб. пособие для физ. спец. вузов. - М.: Высшая школа, 1991. - 175 с. ил.

б) дополнительная литература:

- Савельев, И. В. Основы теоретической физики Т. 2 Квантовая механика В 2 т. - 2-е изд., испр. - М.: Наука: Физматлит, 1996. - 430 с.
- Демиховский, В. Я. Физика квантовых низкоразмерных структур В. Я. Демиховский, Г. А. Вугальтер. - М.: Логос, 2000. - 246,[1] с. ил.

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

Не предусмотрены

г) методические указания для студентов по освоению дисциплины:

- Физика наноразмерных систем - методические указания

из них: учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студента:

- Физика наноразмерных систем - методические указания

Электронная учебно-методическая документация

№	Вид литературы	Наименование ресурса в электронной форме	Библиографическое описание
1	Основная литература	Электронно-библиотечная система издательства Лань	Давыдов, С. Ю. Элементарное введение в теорию наносистем : учебное пособие / С. Ю. Давыдов, А. А. Лебедев, О. В. Посредник. — 2-е изд., перераб. и доп. — Санкт-Петербург : Лань, 2021. — 192 с. — ISBN 978-5-8114-1565-6 https://e.lanbook.com/book/168631
2	Дополнительная литература	Электронно-библиотечная система издательства Лань	Гадиев, Р. М. Физика низкоразмерных систем : учебное пособие / Р. М. Гадиев. — Уфа : БГПУ имени М. Акмуллы, 2013. — 24 с. — ISBN 978-5-87978-828-0 https://e.lanbook.com/book/42269
3	Основная литература	Электронно-библиотечная система издательства Лань	Иродов, И. Е. Задачи по квантовой физике : учебное пособие / И. Е. Иродов. — 6-е изд. — Москва : Лаборатория знаний, 2020. — 220 с. — ISBN 978-5-00101-685-4. https://e.lanbook.com/book/135493

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
Лекции	607 (16)	Персональный компьютер, проектор.