

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет
им. Н.И. Лобачевского»**

Физический факультет
Кафедра физики наноструктур и наноэлектроники

УТВЕРЖДЕНО
решением ученого совета ННГУ прото-
кол № 13 от «30» ноября 2022 г.

Рабочая программа дисциплины

Туннельные явления в нанофизике

Уровень высшего образования
Магистратура

Направление подготовки: 11.04.04 Электроника и наноэлектроника
Направленности (профили): твердотельная электроника и наноэлектроника

Форма обучения
очная

Нижний Новгород
2023

1. Место и цели дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина «Туннельные явления в нанофизике» относится к выборным дисциплинам формируемой участниками образовательных отношений части образовательной программы по направлению подготовки магистров 11.04.04 «Электроника и нанoeлектроника» и осваивается в течение второго семестра первого года обучения в магистратуре. Дисциплина «Туннельные явления в нанофизике» является одним из завершающих разделов теоретической и экспериментальной физики конденсированного состояния. Курс базируется на знаниях студентов, приобретенных в курсах общей физики, математической физики, квантовой механики и физики твердого тела.

Целями освоения дисциплины являются:

формирование у студентов современного представления об основных свойствах твердотельных структур с туннельной связью;

формирование у студентов профессиональных компетенций в соответствии с требованиями установленного ННГУ образовательного стандарта по направлению подготовки 11.04.04 – «Электроника и нанoeлектроника».

2. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями выпускников)

| Формируемые компетенции (код, содержание компетенции) | Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), в соответствии с индикатором достижения компетенции | | Наименование оценочного средства |
|--|---|--|---|
| | Индикатор достижения компетенции (код, содержание индикатора) | Результаты обучения по дисциплине | |
| ПК-4. Готовность формулировать цели и задачи научных исследований в соответствии с тенденциями и перспективами развития электроники и нанoeлектроники, а также смежных областей науки и техники, и способность обоснованно выбирать теоретические и экспериментальные методы и средства решения сформулированных задач | ПК-4.1. Знание тенденций и перспектив развития электроники и нанoeлектроники, а также смежных областей науки и техники ПК-4.2. Умение рассчитывать предельно допустимые и предельные режимы работы изделий микро- и нанoeлектроники ПК-4.3. Навыки обоснованного выбора теоретических | <i>31 (ПК-4) Знать</i> основные методы решения задач рассеяния в одномерных системах, основные методы расчета коэффициентов отражения и прохождения для туннельно-связанных структур; основные принципы сканирующей туннельной микроскопии и спектроскопии твердотельных наноструктур и способы интерпретации результатов туннельных измерений для нормальных, ферромагнитных и сверхпроводящих структур; свойства туннельно-связанных сверхпроводящих систем с эффектом Джозефсона; принципы работы квантовых стандартов тока и напряжения. <i>У1 (ПК-4) Уметь</i> рассчиты- | Вопросы по темам/разделам дисциплины. Комплект задач. Фонд тестовых заданий |

| | | | |
|--|--|--|--|
| | и экспериментальных методов исследования и средства решения сформулированных задач | вать коэффициенты отражения и прохождения при рассеянии электронных волн в одномерных структурах; рассчитывать вольт-амперные характеристики различных металлических систем с туннельной связью; интерпретировать вольт-амперные характеристики систем с туннельной связью. <i>В1 (ПК-4) Владеть</i> навыками решения задач, основанных на полученных в ходе освоения дисциплины знаниях. | |
|--|--|--|--|

Окончательное завершение формирования компетенции ПК-4 происходит при прохождении практики и выполнении научно-исследовательской работы.

3. Структура и содержание дисциплины

3.1. Трудоемкость дисциплины

| | |
|---|---|
| Общая трудоемкость | 3 ЗЕТ |
| Часов по учебному плану | 108 |
| в том числе | |
| аудиторные занятия (контактная работа): | |
| - занятия лекционного типа | 16 |
| - занятия семинарского типа | 16 |
| самостоятельная работа | 38 (работа в семестре) 36 (на подготовку к экзамену) |
| Промежуточная аттестация | 2 семестр – экзамен |

3.2. Содержание дисциплины

| Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины, форма промежуточной аттестации по дисциплине | Всего (часы) | В том числе | | | | | |
|--|--------------|---|---------------------------|----------------------------|--------------|-------|---|
| | | Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы из них | | | | | Самостоятельная работа обучающегося, часы |
| | | Занятия лекционного типа | Занятия семинарского типа | Занятия лабораторного типа | Консультации | Всего | |
| Введение в спецкурс. Задача рассеяния в квантовой механике. Точные решения | 16 | 3 | 3 | | | 6 | 10 |

| | | | | | | | |
|--|----------|---|---|--|--|----------|----|
| Квазиклассическое описание туннелирования | 16 | 2 | 2 | | | 4 | 12 |
| Квазистационарные состояния в квантовой механике | 12 | 2 | 2 | | | 4 | 8 |
| Метод туннельного гамильтониана | 12 | 1 | 1 | | | 2 | 10 |
| Особенности туннельного эффекта в системе нормальных металлов | 20 | 4 | 4 | | | 8 | 12 |
| Особенности туннельного эффекта в системе сверхпроводящих металлов | 18 | 2 | 2 | | | 4 | 14 |
| Особенности туннельного эффекта в системе ферромагнитных металлов | 12 | 2 | 2 | | | 4 | 8 |
| Контроль самостоятельной работы | 2 | | | | | 2 | |
| Итоговая аттестация - экзамен | | | | | | | |

Текущий контроль успеваемости осуществляется в виде решений и последующей проверки домашних контрольных работ, а также в рамках занятий практического и семинарского типа, групповых и индивидуальных консультаций. Итоговый контроль осуществляется на экзамене.

4. Образовательные технологии

При изучении данного курса используются современные образовательные технологии. Предусматривается широкое использование в учебном процессе активных и интерактивных форм проведения занятий (компьютерное моделирование, разбор конкретных ситуаций, тренинги по решению практических задач) в сочетании с внеаудиторной работой с целью формирования и развития профессиональных навыков обучающихся.

На занятиях лекционного типа используются мультимедийные средства поддержки образовательного процесса. На занятиях практического типа разбираются решения задач различной степени сложности, проводятся обсуждения рассматриваемых проблем в свете последних научных достижений в данной области. Студенты работают как индивидуально, так и коллективно.

Самостоятельная работа включает в себя выполнение домашних заданий, написание рефератов с предоставлением докладов или кратких сообщений, а также теоретическую подготовку к занятиям по материалам лекций и рекомендованной литературе, приведенной в конце данной программы. Кроме того, студенты имеют возможность принимать участие в семинарах с представителями российских и зарубежных научных организаций, мастер-классы экспертов и специалистов в области качественно-численного анализа конкретных современных задач нанофизики.

Формой промежуточной аттестации знаний студентов по дисциплине является экзамен, в ходе которого оцениваются уровень теоретических знаний и навыки решения практических задач.

5. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся

Самостоятельная работа студента – неотъемлемая часть подготовки высококвалифицированного специалиста в соответствующей области. Ее цель – формирование у студентов способностей и навыков к непрерывному самообразованию и профессиональному совершенствованию.

Самостоятельная работа студентов подразумевает проработку лекционного и дополнительного материала, выполнение домашних заданий с последующей проверкой навыков решения задач.

Проработка лекционного материала осуществляется еженедельно после проведения аудиторных занятий в рамках часов, отведенных студентам на самостоятельную работу. Кроме того, работа с лекционным и дополнительным материалом (рекомендованной литературой, приведенной в конце данной программы) проводится в период сессии при подготовке к экзамену по дисциплине.

Выполнение домашних заданий осуществляется раз в две недели в соответствии с графиком изучения соответствующего лекционного материала и проведения практических занятий по соответствующей тематике.

Задачи для выполнения самостоятельных контрольных работ по каждому разделу дисциплины и темы рефератов составляются преподавателем самостоятельно при ежегодном обновлении банка тестовых заданий. Количество вариантов зависит от числа обучающихся.

6. Фонд оценочных средств для промежуточной аттестации по дисциплине, включающий:

6.1. Перечень компетенций выпускников образовательной программы с указанием результатов обучения (знаний, умений, владений), характеризующих этапы их формирования, описание показателей и критериев оценивания компетенций на различных этапах их формирования.

ПК-4 – Готовность формулировать цели и задачи научных исследований в соответствии с тенденциями и перспективами развития электроники и нанoeлектроники, а также смежных областей науки и техники, и способность обоснованно выбирать теоретические и экспериментальные методы и средства решения сформулированных задач.

| Индикаторы компетенции | Критерии оценивания (дескрипторы) | | | | | | |
|---|--|--|---|--|---|--|--|
| | «незачет» | | «зачет» | | | | |
| | «плохо» | «неудовлетворительно» | «удовлетворительно» | «хорошо» | «очень хорошо» | «отлично» | «превосходно» |
| <u>Знания</u> Знать основные методы решения задач рассеяния в одномерных системах, основные методы расчета коэффициентов отражения и прохождения для туннельно-связанных структур; основные принципы сканирующей туннельной микроскопии и спектроскопии твердотельных наноструктур и способы интерпретации результатов туннельных измерений для нормальных, ферромагнитных и сверхпроводящих структур; свойства туннельно-связанных сверхпроводящих систем с эффектом Джозефсона; принципы работы квантовых стандартов тока и напряжения | отсутствие знаний материала | наличие грубых ошибок в основном материале | знание основного материала с рядом негрубых ошибок | знание основного материала с рядом заметных погрешностей | знание основного материала с незначительными погрешностями | знание основного материала без ошибок и погрешностей | знание основного и дополнительного материала без ошибок и погрешностей |
| <u>Умения</u> Уметь рассчитывать коэффициенты отражения и прохождения при рассеянии электронных волн в одномерных структурах; рассчитывать вольт-амперные характеристики различных металлических систем с туннельной связью; интерпретировать вольт-амперные характеристики систем с туннельной связью. | Полное отсутствие умения использовать основные законы нанوفизики для решения задач | Неумение использовать основные законы нанوفизики для решения задач (демонстрация грубых ошибок, противоречащих основным законам) | Умение использовать основные законы нанوفизики для решения стандартных задач с негрубыми ошибками | Умение использовать все изученные законы нанوفизики для решения стандартных задач с негрубыми ошибками | Умение использовать все изученные законы нанوفизики для решения стандартных задач с незначительными погрешностями | Умение использовать все изученные законы нанوفизики для решения стандартных задач и задач повышенной сложности с незначительными погрешностями | Умение использовать все изученные законы нанوفизики для решения стандартных задач и задач повышенной сложности |

| | | | | | | | |
|---|--|--|---|---|--|--|--|
| <u>Навыки</u> Владеть навыками решения задач, основанных на полученных в ходе освоения дисциплины знаниях. | Полное отсутствие навыка решения стандартных задач | Не владение навыками решения стандартных задач (демонстрация грубых ошибок, противоречащих основным законам нанотехники) | Владение навыками решения стандартных задач по основным разделам курса с негрубыми ошибками | Владение навыками решения стандартных задач по всем разделам курса с негрубыми ошибками | Владение навыками решения стандартных задач по всем разделам курса с незначительными погрешностями | Владение навыками решения стандартных задач и задач повышенной сложности с незначительными погрешностями | Владение навыками решения стандартных задач и задач повышенной сложности |
| Шкала оценок по проценту правильно выполненных контрольных заданий | 0 – 20 % | 20 – 50 % | 50 – 70 % | 70-80 % | 80 – 90 % | 90 – 99 % | 100% |

6.2. Описание шкал оценивания

Итоговый контроль качества усвоения студентами содержания дисциплины проводится в виде экзамена, на котором определяется:

- уровень усвоения студентами основного учебного материала по дисциплине;
- уровень понимания студентами изученного материала
- способности студентов использовать полученные знания для решения конкретных задач.

Экзамен проводится в устной форме. Устная часть экзамена заключается в ответе студентом на теоретические вопросы курса (с предварительной подготовкой) и последующем собеседовании в рамках тематики курса. Собеседование проводится в форме вопросов, на которые студент должен дать краткий ответ. Практическая часть экзамена предусматривает решение двух задач по различным разделам курса.

| Оценка | Уровень подготовки |
|-------------|--|
| Превосходно | Высокий уровень подготовки, безупречное владение теоретическим материалом. Студент дает полный и развернутый ответ на все теоретические вопросы билета; точно отвечает на дополнительные вопросы; приводит исчерпывающие, аргументированные решения всех сформулированных в билете задач. Изложение решений и полученные ответы отличаются логической последовательностью, четкостью в выражении мыслей и обоснованностью выводов, демонстрирующих знание общефизических и профессиональных дисциплин, умение уверенно применять на практике приобретенные навыки, владение в полной мере методиками решения задач. 100 % -ное выполнение контрольных экзаменационных заданий |
| Отлично | Высокий уровень подготовки с незначительными ошибками. Студент дает полный и развернутый ответ на все теоретические вопросы билета; точно отвечает на дополнительные вопросы; приводит почти полные, аргументированные решения всех сформулированных в билете задач с незначительными недочетами. Изложение решений и полученные ответы отличаются логической последовательностью, четкостью в выражении мыслей и обоснованностью выводов, демонстрирующих знание общефизических и профессиональных дисциплин, умение применять на практике приобретенные навыки, владение методиками решения задач. Выполнение контрольных экзаменационных заданий на 90% и выше |

| | |
|---------------------|---|
| Очень хорошо | <p>Хорошая подготовка. Студент дает ответ на все теоретические вопросы билета с небольшими неточностями; неполно отвечает на дополнительные вопросы; приводит достаточно аргументированные и почти полные решения всех сформулированных в билете задач с незначительными недочетами; или исчерпывающее решение приводится только для одной из двух задач билета, а вторая задача решена с заметными недочетами. Изложение решений и полученные ответы отличаются логической последовательностью, четкостью в выражении мыслей и обоснованностью выводов, демонстрирующих знание общефизических и профессиональных дисциплин, умение применять на практике приобретенные навыки, владение основными методиками решения задач.</p> <p>Выполнение контрольных экзаменационных заданий от 80 до 90%.</p> |
| Хорошо | <p>В целом хорошая подготовка с заметными ошибками или недочетами. Студент дает полный ответ на все теоретические вопросы билета с небольшими неточностями, допускает ошибки при ответах на дополнительные вопросы; приводит почти полные решения всех сформулированных в билете задач с некоторыми недочетами; или исчерпывающее решение приведено только для одной из двух задач билета, а вторая задача решена со значительными погрешностями. Изложение решений и полученные ответы отличаются логической последовательностью, достаточной четкостью в выражении мыслей и не всегда полной обоснованностью выводов, демонстрирующих, в целом, знание общефизических и профессиональных дисциплин, умение применять на практике приобретенные навыки, владение основными методиками решения задач.</p> <p>Выполнение контрольных экзаменационных заданий от 70 до 80%.</p> |
| Удовлетворительно | <p>Минимально достаточный уровень подготовки. Студент показывает минимальный уровень теоретических знаний, допускает ошибки при ответах на дополнительные вопросы; приводит неполные, слабо аргументированные решения всех сформулированных в билете задач. Изложение решений и полученные ответы не отличаются стройной логической последовательностью, четкостью в выражении мыслей и обоснованностью выводов, что говорит о недостаточно полном понимании общефизических и профессиональных дисциплин, умении применять на практике лишь некоторые приобретенные навыки, владении не всеми изученными методиками решения задач.</p> <p>Выполнение контрольных экзаменационных заданий от 50 до 70%.</p> |
| Неудовлетворительно | <p>Подготовка недостаточная и требует дополнительного изучения материала. Студент дает ошибочные ответы, как на теоретические вопросы билета, так и на наводящие и дополнительные вопросы экзаменатора; приводит решения сформулированных в билете задач с грубыми недочетами, что говорит о недостатке знаний по общефизическим и профессиональным дисциплинам, отсутствии умения применять на практике приобретенные навыки, не владение методиками решения задач.</p> <p>Выполнение контрольных экзаменационных заданий до 50%.</p> |
| Плохо | <p>Подготовка абсолютно недостаточная. Студент не отвечает на поставленные вопросы, демонстрирует полное непонимание сформулированных в билете задач.</p> <p>Выполнение контрольных экзаменационных заданий менее 20 %.</p> |

6.3. Критерии и процедуры оценивания результатов обучения по дисциплине (модулю), характеризующих этапы формирования компетенций.

Для оценивания результатов обучения в виде знаний используются следующие процедуры и технологии:

- индивидуальное собеседование,
- устные и/или письменные ответы на вопросы.

Для оценивания результатов обучения в виде умений и владений используются следующие процедуры и технологии:

- практические контрольные задания (далее – ПКЗ), включающие одну или несколько задач.

По сложности ПКЗ разделяются на простые (стандартные) и комплексные задания. Простые ПКЗ предполагают решение в одно или два действия, применяются для оценки умений. Комплексные задания (задания повышенной сложности) требуют поэтапного решения и развернутого ответа с применением нестандартных подходов к решению. Комплексные практические задания применяются для оценки владений навыками.

6.4. Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения, характеризующих этапы формирования компетенций и (или) для итогового контроля сформированности компетенции.

Теоретические вопросы для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины:

- 1) Записать матрицу распространения для случая наклонного падения частицы на одномерный потенциальный барьер. Рассчитать вероятность отражения и прохождения в этом случае.
- 2) Используя метод матрицы распространения рассчитать энергетический спектр частицы в одномерной потенциальной яме конечной высоты. Рассмотреть симметричный и несимметричный случаи.
- 3) Используя метод матрицы распространения рассчитать спектр частицы в двух связанных потенциальных ямах.
- 4) Используя ВКБ-метод рассчитать уровни энергии частицы в потенциальной яме.
- 5) Рассчитать вольт-амперную характеристику туннельного перехода, состоящего из двух нормальных металлов, при $T=0$.
- 6) Рассчитать квазичастичную ветку вольт-амперной характеристики туннельного перехода, состоящего из двух одинаковых сверхпроводников, при $T=0$.
- 7) Рассчитать зависимость полного джозефсоновского тока через короткий джозефсоновский контакт от внешнего магнитного поля.
- 8) Решить задачу о структуре джозефсоновского вихря в широком джозефсоновском переходе.
- 9) В рамках модели резистивно-шунтированного перехода рассчитать вольт-амперную характеристику джозефсоновского перехода для заданного стороннего тока (задача о стационарном эффекте Джозефсона).
- 10) В рамках модели резистивно-шунтированного перехода рассчитать вольт-амперную характеристику джозефсоновского перехода для заданного переменного напряжения (задача о нестационарном эффекте Джозефсона).

Типовые задачи для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины:

Для оценки сформированности компетенции ПК-4:

Задача 1.1

Используя метод матрицы распространения рассчитать спектр разрешенных состояний для электрона в периодическом потенциале $U(x)$: $U(x)=0$ при $0 < x < a$ и $U(x)=U_0$ при $a < x < b$, где $a+b$ – период структуры (модель Кронига-Пенни).

Задача 1.2

Используя ВКБ-метод рассчитать уровни энергии частицы в двух связанных потенциальных ямах.

Задача 2.1

Рассчитать вольт-амперную характеристику туннельного перехода, состоящего из двух нормальных металлов и квантовой ямы с дискретным энергетическим спектром (резонансно-туннельный диод), при $T=0$.

Задача 2.2

Рассчитать вольт-амперную характеристику туннельного перехода, состоящего из сверхпроводника и нормального металла, при $T=0$.

7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины «Туннельные явления в нанофизике»

а) основная литература:

1. Блохинцев Д.И., «Основы квантовой механики». — М.: Наука, 1983 <https://e-lib.unn.ru/MegaPro/Web/SearchResult/ToPage/1>
2. Галицкий В.М., Карнаков Б.М. и Коган В.И. «Задачи по квантовой механике». — Москва: Наука, 1992. <https://e-lib.unn.ru/MegaPro/Web/SearchResult/ToPage/1>

б) дополнительная литература:

1. Демиховский В.Я., Вугальтер Г.А., «Физика квантовых низкоразмерных структур». — М: Логос, 2000 <https://e-lib.unn.ru/MegaPro/Web/SearchResult/ToPage/1>
2. Солимар Л. «Туннельный эффект в сверхпроводниках и его применение». — Москва: Мир, 1974. <https://e-lib.unn.ru/MegaPro/Web/SearchResult/ToPage/1>
3. Фрёман Н. и Фрёман П.О. «ВКБ-приближение». — Москва: Мир, 1967. <https://e-lib.unn.ru/MegaPro/Web/SearchResult/ToPage/1>
4. Лесовик Г.Б. и Садовский И.А. «Описание квантового электронного транспорта с помощью матриц рассеяния». — Успехи физических наук, т. 181, стр. 1041—1096 (2011). -https://ufn.ru/ru/articles/2011/10/b/свободный_доступ.

в) программное обеспечение и Интернет-ресурсы

Журнальный портал ФТИ им. А.Ф. Иоффе <http://journals.ioffe.ru/>.

8. Материально-техническое обеспечение дисциплины

Помещения представляют собой учебные аудитории для проведения учебных занятий, предусмотренных программой, оснащенные оборудованием и техническими средствами обучения: специализированной мебелью, меловыми или магнитно-маркерными досками для представления учебной информации большой аудитории.

Для проведения лекций и практических занятий требуется типовое оборудование лекционной аудитории.

Для подготовки самостоятельных контрольных работ и для их графического представления (если это необходимо), а также для расширения коммуникационных возможностей студенты имеют возможность работать в компьютерных классах с соответствующим лицензионным программным обеспечением и выходом в Интернет.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет" и обеспечены доступом в электронную информационно-образовательную среду.

Программа составлена в соответствии с требованиями установленного ННГУ образовательного стандарта высшего образования по направлению подготовки 11.04.04 – «Электроника и нанoeлектроника».

Автор

профессор межфакультетской базовой кафедры «Физика наноструктур и нанoeлектроника» Нижегородского государственного университета им. Н. И. Лобачевского д. ф.-м. н. А.Ю. Аладышкин

Рецензент

заведующий отдела физики сверхпроводников ИФМ РАН, д. ф.-м.н А.С. Мельников

Заведующий межфакультетской базовой кафедры «Физика наноструктур и нанoeлектроника» Нижегородского государственного университета им. Н. И. Лобачевского, руководитель научного направления «Физика микро- и наноструктур» ИФМ РАН, д. ф.-м. н., член-корреспондент РАН З.Ф. Красильник

Программа одобрена на заседании Учебно-методической комиссии физического факультета ННГУ, протокол б/н от «17» ноября 2022 г.

Председатель Учебно-методической комиссии физического факультета ННГУ
к.ф.-м.н. Перов А.А.