

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

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

УТВЕРЖДЕНО
решением
Ученого совета ННГУ
протокол от
« ____ » _____ 202_ г. № ____

Рабочая программа дисциплины

Туннельные явления в нанофизике

(наименование дисциплины (модуля))

Уровень высшего образования

магистратура

(бакалавриат / магистратура / специалитет)

Направление подготовки / специальность

03.04.02 Физика

(указывается код и наименование направления подготовки / специальности)

Направленность образовательной программы

магистерская программа "Квантовые и нейроморфные технологии"

(указывается профиль / магистерская программа / специализация)

Квалификация (степень)

магистр

(бакалавр / магистр / специалист)

Форма обучения

очная

(очная / очно-заочная / заочная)

Год начала обучения

2023

(для обучающихся какого года начала обучения разработана Рабочая программа)

Нижний Новгород

1. Место и цели дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина «Туннельные явления в нанофизике» относится к вариативной части Блока 1 «Дисциплины, модули» ОПОП. Дисциплина является элективной дисциплиной, преподается во втором семестре первого года обучения в магистратуре.

Целями освоения дисциплины являются:

- формирование у студентов современного представления об основных свойствах твердотельных структур с туннельной связью;
- формирование у студентов общепрофессиональных и профессиональных компетенций в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки 03.04.02 «Физика».

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

Формируемые компетенции	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), характеризующие этапы формирования компетенций
ПК-2 Способен самостоятельно анализировать, не предвзято оценивать и ориентироваться в передовых теоретических концепциях и достижениях современной физики	<i>З1 (ПК-2) 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-2) Уметь</i> 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. <i>В1 (ПК-2) Владеть</i> навыками решения задач, основанных на полученных в ходе освоения дисциплины знаниях.

3. Структура и содержание дисциплины

Объем дисциплины составляет 3 зачетных единицы, всего 108 часов, из которых 34 часа составляет контактная работа обучающегося с преподавателем (2 часа – мероприятия промежуточной аттестации; 16 часов занятия лекционного типа, 16 часов занятия семинарского типа (практические занятия), в том числе 2 часа – мероприятия текущего контроля успеваемости), 74 часа составляет самостоятельная работа обучающегося (38 часов самостоятельная работа в течение семестра, 36 часов самостоятельная работа при подготовке к промежуточной аттестации).

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	Всего	
Введение в спецкурс. Задача рассеяния в квантовой механике. Точные решения	12	3	3		6	6
Квазиклассическое описание туннелирования	9	2	2		4	5
Квазистационарные состояния в квантовой механике	9	2	2		4	5
Метод туннельного гамильтониана	9	2	2		4	5
Особенности туннельного эффекта в системе нормальных металлов	9	2	2		4	5
Особенности туннельного эффекта в системе сверхпроводящих металлов	12	3	3		6	6
Особенности туннельного эффекта в системе ферромагнитных металлов	10	2	2		4	6
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 дисциплины используются современные образовательные технологии. Предусматривается широкое использование в учебном процессе активных и интерактивных форм проведения занятий (разбор конкретных ситуаций, тренинги по решению практических задач) в сочетании с внеаудиторной работой с целью формирования и развития профессиональных навыков обучающихся.

Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем) по дисциплине проходит в форме лекций и практических занятий, а также в виде коллективных и индивидуальных консультаций. На занятиях лекционного типа используются мультимедийные средства поддержки образовательного процесса, часть занятий проводятся в виде лекций с проблемным изложением материала. 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 контрольных работ и 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, проводимых в Институте физике микроструктур Российской академии наук.

Формой итогового контроля знаний студентов по дисциплине является экзамен, в ходе которого оценивается 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

6.1. Описание шкал оценивания результатов обучения по дисциплине

Промежуточной аттестацией для дисциплины «Туннельные явления в нанофизике» является **экзамен**.

По итогам экзамена выставляется оценка по семибалльной шкале: оценки «Плохо» и «Неудовлетворительно» означают отсутствие аттестации, оценки «Удовлетворительно», «Хорошо», «Очень хорошо», «Отлично» и «Превосходно» выставляются при успешном прохождении аттестации.

6.2. Процедуры и критерии оценивания результатов обучения по дисциплине

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

- индивидуальное собеседование (промежуточная аттестация).

Контрольные вопросы для индивидуального собеседования представлены в п. 6.3 настоящей Рабочей программы дисциплины.

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

- выполнение практических заданий (текущий контроль, промежуточная аттестация).

Примеры практических заданий для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации представлены в п. 6.3 настоящей Рабочей программы дисциплины.

Критериями оценивания являются полнота знаний, наличие умений и владений (навыков), перечисленных в п. 5 настоящей Рабочей программы дисциплины.

«Плохо» – обучающийся не продемонстрировал никаких знаний об основных теоретических разделах курса, не показал никаких умений и навыков выполнения практических заданий;

«Неудовлетворительно» – обучающийся не продемонстрировал представления об основных теоретических разделах курса, не показал минимально допустимый уровень умений и навыков выполнения практических заданий;

«Удовлетворительно» – обучающийся продемонстрировал изложение формулировок основных теоретических положений курса и успешно показал умения и навыки выполнения практических заданий базового уровня сложности;

«Хорошо» – обучающийся продемонстрировал связное изложение основных теоретических положений курса и успешно показал умения и навыки выполнения стандартных практических заданий;

«Очень хорошо» – обучающийся продемонстрировал связное изложение практически всех теоретических положений курса и успешно показал умения и навыки выполнения стандартных практических заданий;

«Отлично» – обучающийся продемонстрировал связное изложение всех теоретических положений курса и успешно показал умения и навыки выполнения практических заданий повышенного уровня сложности;

«Превосходно» – обучающийся продемонстрировал уровень знаний в объеме, превышающем стандартную программу подготовки, и продемонстрировал творческий подход к выполнению практических заданий повышенного уровня сложности.

6.3. Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения

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:

Задача 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 2

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

Задача 3

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 4

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

6.4. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания

1. Положение «О проведении текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации обучающихся в ННГУ», утвержденное приказом ректора ННГУ от 13.02.2014 №55-ОД.

2. Положение о фонде оценочных средств, утвержденное приказом ректора ННГУ от 10.06.2015 №247-ОД.

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

а) основная литература:

1. Блохинцев Д.И., «Основы квантовой механики». — М.: Наука, 1983
<http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=70099&DB=1>
2. Галицкий В.М., Карнаков Б.М. и Коган В.И. «Задачи по квантовой механике». — Москва: Наука, 1992. <http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=70108&DB=1>

б) дополнительная литература:

1. Демиховский В.Я., Вугальтер Г.А., «Физика квантовых низкоразмерных структур». — М: Логос, 2000 <http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=38775&DB=1>
2. Солимар Л. «Туннельный эффект в сверхпроводниках и его применение». — Москва: Мир, 1974. <http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=76585&DB=1>
3. Фрёман Н. и Фрёман П.О. «ВКБ-приближение». — Москва: Мир, 1967. <http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=71560&DB=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

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.

Программа составлена в соответствии с требованиями федерального государственного образовательного стандарта высшего образования по направлению подготовки 03.04.02 Физика.

Автор(ы) _____

А.Ю. Аладышкин

Рецензент(ы)

Зав. межфакультетской базовой кафедрой
«Физика наноструктур и наноэлектроника»,
д. ф.-м. н., профессор,
чл.-корр. РАН

_____ / Красильник З.Ф. /

Программа одобрена на заседании Учебно-методической комиссии
физического факультета ННГУ от «___» _____ 2023 года, протокол
№ б/н.

Председатель
Учебно-методической комиссии
физического факультета ННГУ

_____ / Перов А.А. /