

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

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

Радиофизический факультет

(факультет / институт / филиал)

УТВЕРЖДЕНО
решением президиума
ученого совета ННГУ
протокол от
«31» мая 2023 г. № 6

Рабочая программа дисциплины

Туннельные явления в нанофизике

(наименование дисциплины (модуля))

Уровень высшего образования

магистратура

(бакалавриат / магистратура / специалитет)

Направление подготовки / специальность

03.04.03 Радиофизика

(указывается код и наименование направления подготовки / специальности)

Направленность образовательной программы

Физическая электроника

(указывается профиль / магистерская программа / специализация)

Форма обучения

очная

(очная / очно-заочная / заочная)

Нижний Новгород

2023 год

1. Место дисциплины в структуре ООП

| № варианта | Место дисциплины в учебном плане образовательной программы | Стандартный текст для автоматического заполнения в конструкторе РПД |
|------------|---|---|
| 2 | Блок 1. Дисциплины (модули) Часть, формируемая участниками образовательных отношений | Дисциплина Б1.В.ДВ.06.04 <i>Туннельные явления в нанофизике</i> относится к части ООП направления подготовки 03.04.03 Радиофизика, формируемой участниками образовательных отношений. |

2. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями и индикаторами достижения компетенций)

| 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-1. Способен анализировать и обрабатывать научную информацию и результаты исследований в области физики и радиофизики при решении задач своей профессиональной деятельности | <p>ПК-1.1. Применяет принципы сбора и анализа информации, рассматривает и оценивает современные научные достижения, а также генерирует новые идеи при решении исследовательских и практических задач.</p> <p>ПК-1.2. Работает с большим объемом данных, систематизирует и анализирует информацию, полученную из различных источников, в том числе с использованием современных информационных и коммуникационных технологий.</p> | <p><i>Знать:</i> основы теории рассеяния в квантовой механике; основы теории туннельного эффекта в задачах физики твердого тела; методы расчета вольт-амперных характеристик туннельно-связанных систем; принципы работы эмиссионного и сканирующего туннельного микроскопа; связь туннельной проводимости и локальной плотности состояний.</p> <p><i>Уметь</i> пользоваться законами квантовой механики для расчета коэффициентов отражения и прохождения волн в неоднородном потенциале, рассчитывать вольт-амперные характеристики туннельно-связанных систем.</p> <p><i>Владеть</i> навыками решения задач, основанных на полученных в ходе освоения дисциплины знаниях.</p> | <i>Зачет</i> |
| ПК-2. Способен выполнять теоретические и экспериментальные | ПК-2.1. Анализирует современное состояние исследований в | <p><i>Уметь</i> применять полученные знания при проведении научных исследований в избранной области.</p> <p><i>Владеть</i> основными методами</p> | <i>Зачет/экзамен</i> |

| | | | |
|--|---|---|--|
| исследования и разработки по отдельным разделам тем научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в области физики и радиофизики и оформлять их результаты | <p>области микро- и, наноэлектроники, мощной электроники, современные подходы к описанию и моделированию различных физических явлений и оценке полученных результатов.</p> <p>ПК-2.2. Выбирает и применяет аналитические, аналитико-численные, экспериментальные методы исследования в соответствии с типом поставленной задачи.</p> <p>ПК-2.3. Участвует в планировании, подготовке и проведении НИР.</p> <p>ПК-2.4. Анализирует полученные данные, формулирует выводы и рекомендации по отдельным разделам тем в области микро- и, наноэлектроники, мощной электроники.</p> | теоретического описания макроскопических систем и использовать их при необходимости при проведении теоретических и/или экспериментальных физических исследований. | |
|--|---|---|--|

3. Структура и содержание дисциплины

3.1 Трудоемкость дисциплины

| | |
|---|-----------------------------|
| | очная форма обучения |
| Общая трудоемкость | 2 ЗЕТ |
| Часов по учебному плану | 72 |
| в том числе | |
| аудиторные занятия (контактная работа): - занятия лекционного типа - занятия семинарского типа (практические занятия / | 32 |

| | |
|---|----|
| лабораторные работы) | |
| самостоятельная работа | 39 |
| КСР | 1 |
| Промежуточная аттестация – Зачет или экзамен | |

3.2. Содержание дисциплины

| Наименование раздела дисциплины | Всего, часов | В том числе | | | | | Самостоятельная работа обучающегося, часов |
|--|-----------------|--------------------------|------------------------------|-------------------------------|--------------|-------|---|
| | | Контактная работа, часов | | | | Всего | |
| | | Занятия лекционного типа | Занятия семинарского типа | Занятия лабораторного типа | Консультации | | |
| Введение в спецкурс. Задача рассеяния в квантовой механике. Точные решения | 12 | 6 | 0 | 0 | 6 | 7 | |
| Квазиклассическое описание туннелирования | 8 | 4 | 0 | 0 | 4 | 5 | |
| Квазистационарные состояния в квантовой механике | 8 | 4 | 0 | 0 | 4 | 5 | |
| Метод туннельного гамильтониана | 4 | 2 | 0 | 0 | 2 | 2 | |
| Особенности туннельного эффекта в системе нормальных металлов | 16 | 6 | 0 | 0 | 8 | 8 | |
| Особенности туннельного эффекта в системе сверхпроводящих металлов | 15 | 5 | 0 | 0 | 5 | 7 | |
| Особенности туннельного эффекта в системе ферромагнитных металлов | 8 | 4 | 0 | 0 | 4 | 5 | |
| Текущий контроль | 1 | 1 | | | | | |
| Промежуточная аттестация – зачет | | | | | | | |

4. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся

Помимо ознакомления с рекомендованной литературой в процессе обучения самостоятельная работа обучающегося предполагает проработку контрольных вопросов. Текущий контроль успеваемости проводится во время занятий семинарского типа и научно-практических занятий.

5. Фонд оценочных средств для промежуточной аттестации по дисциплине (модулю),

включающий:

5.1. Описание шкал оценивания результатов обучения по дисциплине

| Уровень сформированности компетенций (индикатора достижения компетенций) | Шкала оценивания сформированности компетенций | | | | | | |
|--|--|--|--|---|---|---|---|
| | плохо | неудовлетворительно | удовлетворительно | хорошо | очень хорошо | отлично | превосходно |
| | не зачтено | | зачтено | | | | |
| <u>Знания</u> | Отсутствие знаний теоретического материала. Невозможность оценить полноту знаний вследствие отказа обучающегося от ответа | Уровень знаний ниже минимальных требований. Имели место грубые ошибки. | Минимально допустимый уровень знаний. Допущено много негрубых ошибок. | Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько негрубых ошибок | Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько несущественных ошибок | Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки, без ошибок. | Уровень знаний в объеме, превышающем программу подготовки. |
| <u>Умения</u> | Отсутствие минимальных умений . Невозможность оценить наличие умений вследствие отказа обучающегося от ответа | При решении стандартных задач не продемонстрированы основные умения. Имели место грубые ошибки. | Продemonстрированы основные умения. Решены типовые задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания но не в полном объеме. | Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, в полном объеме, но некоторые с недочетами. | Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи . Выполнены все задания, в полном объеме, но некоторые с недочетами. | Продemonстрированы все основные умения, решены все основные задачи с отдельными несущественным недочетами, выполнены все задания в полном объеме. | Продemonстрированы все основные умения, решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном объеме без недочетов |
| <u>Навыки</u> | Отсутствие владения материалом. Невозможность оценить наличие навыков вследствие отказа обучающегося от ответа | При решении стандартных задач не продемонстрированы базовые навыки. Имели место грубые ошибки. | Имеется минимальный набор навыков для решения стандартных задач с некоторыми недочетами | Продemonстрированы базовые навыки при решении стандартных задач с некоторыми недочетами | Продemonстрированы базовые навыки при решении стандартных задач без ошибок и недочетов. | Продemonстрированы навыки при решении нестандартных задач без ошибок и недочетов. | Продemonстрирован творческий подход к решению нестандартных задач |

Шкала оценки при промежуточной аттестации

| Оценка | Уровень подготовки |
|--------|--------------------|
|--------|--------------------|

| | | |
|-------------------|----------------------------|---|
| | превосходно | Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «превосходно», продемонстрированы знания, умения, владения по соответствующим компетенциям на уровне, выше предусмотренного программой |
| зачтено | отлично | Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «отлично», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «отлично» |
| | очень хорошо | Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «очень хорошо», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «очень хорошо» |
| | хорошо | Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «хорошо», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «хорошо» |
| | удовлетворительно | Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «удовлетворительно», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «удовлетворительно» |
| не зачтено | неудовлетворительно | Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «неудовлетворительно», ни одна из компетенций не сформирована на уровне «плохо» |
| | плохо | Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «плохо» |

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

5.2.1 Контрольные вопросы

| Вопрос | Код компетенции (согласно РПД) |
|---|-----------------------------------|
| 1. Применение формализма матриц рассеяния и трансфер-матриц для решения квантовомеханических задач рассеяния. | ПК-1 |
| 2. Осцилляции электронной плотности в туннельно-связанных потенциальных ямах. Представление о скорости туннелирования. | ПК-1 |
| 3. Вольт-амперная характеристика туннельного перехода, состоящего из двух нормальных металлов. Случай малых напряжений. | ПК-1 |
| 4. Холодная полевая эмиссия в электрическом поле. Формула Фаулера-Нордхейма. | ПК-1 |
| 5. Резонансное когерентное туннелирование в плоскостной структуре. Вольт-амперная характеристик резонансно-туннельного диода. | ПК-1 |
| 6. Принцип работы сканирующего туннельного микроскопа. | ПК-1 |
| 7. Низкотемпературная сканирующая туннельная спектроскопия. | ПК-1 |

| | |
|---|------|
| 8. Принцип работы электронного эмиссионного микроскопа. | ПК-1 |
| 9. Кулоновская блокада туннелирования в одноэлектронном транзисторе с затвором. | ПК-1 |
| 10. Квазиклассическое приближение (Вентцеля-Крамерса-Бриллюэна). Прохождение частицы через квазиклассический потенциальный барьер. Формула Кембла. | ПК-1 |
| 11. Связь туннельной проводимости и локальной плотности состояний (задача Терсофа - Хаманна). | ПК-1 |
| 12. Квазичастичное туннелирование в сверхпроводниках. Вольт-амперные характеристики системы «сверхпроводник – изолятор – нормальный металл» и «сверхпроводник – изолятор – сверхпроводник». | ПК-2 |
| 13. Критический ток короткого джозефсоновского перехода. Осцилляции критического тока в магнитном поле. | ПК-2 |
| 14. Стационарный эффект Джозефсона. | ПК-2 |
| 15. Нестационарный эффект Джозефсона. Вольт-амперная характеристика короткого джозефсоновского перехода в модели резистивно-шунтированного перехода для заданного тока. | ПК-2 |
| 16. Низкотемпературная сканирующая туннельная спектроскопия и проблема визуализации вихрей (включений нормального металла в сверхпроводящих пленках). | ПК-2 |
| 17. Принцип работ двухконтактного квантового интерферометра постоянного тока (dc-SQUID) | ПК-2 |

5.2.3. Типовые задания/задачи для оценки сформированности компетенции ПК-1, ПК-2

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 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).
5. Используя ВКБ-метод рассчитать уровни энергии частицы в потенциальной яме.
6. Используя ВКБ-метод рассчитать уровни энергии частицы в двух связанных потенциальных ямах.
7. Рассчитать вольт-амперную характеристику туннельного перехода, состоящего из двух нормальных металлов, при $T=0$.
8. Рассчитать вольт-амперную характеристику туннельного перехода, состоящего из двух нормальных металлов и квантовой ямы с дискретным энергетическим спектром (резонансно-туннельный диод), при $T=0$.

9. Рассчитать вольт-амперную характеристику туннельного перехода, состоящего из сверхпроводника и нормального металла, при $T=0$.
10. Рассчитать квазичастичную ветку вольт-амперной характеристики туннельного перехода, состоящего из двух одинаковых сверхпроводников, при $T=0$.
11. Рассчитать зависимость полного джозефсоновского тока через короткий джозефсоновский контакт от внешнего магнитного поля.
12. Решить задачу о структуре джозефсоновского вихря в широком джозефсоновском переходе.
13. В рамках модели резистивно-шунтированного перехода рассчитать вольт-амперную характеристику джозефсоновского перехода для заданного стороннего тока (задача о стационарном эффекте Джозефсона).
14. В рамках модели резистивно-шунтированного перехода рассчитать вольт-амперную характеристику джозефсоновского перехода для заданного переменного напряжения (задача о нестационарном эффекте Джозефсона).

6. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

а) основная литература:

1. Бурштейн Э., Лундквист С., «Туннельные явления в твердых телах». — М., 1973. Всего экземпляров: 3.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М., «Квантовая механика (нерелятивистская теория)». — М.: Физматлит, 2016. Постоянная ссылка на документ: <http://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=741026&idb=0>
3. Демиховский В.Я., Вугальтер Г.А., «Физика квантовых низкоразмерных структур». — М: Логос, 2000. Всего экземпляров: 3.
4. Абрикосов А.А., «Основы теории металлов». — М.: Физматлит, 2010. Постоянная ссылка на документ: <http://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=636103&idb=0>.
5. Солимар Л. «Туннельный эффект в сверхпроводниках и его применение». — Москва: Мир, 1974. Всего экземпляров: 4.

б) дополнительная литература:

1. Блохинцев Д.И., «Основы квантовой механики». — М.: Наука, 1976. Всего экземпляров: 86.
2. Бом Д., «Квантовая теория» — М.: Наука, 1965. Всего экземпляров: 4.
3. Галицкий В.М., Карнаков Б.М. и Коган В.И. «Задачи по квантовой механике». — Москва: Наука, 1981. Всего экземпляров: 44.
4. Фрёман Н. и Фрёман П.О. «ВКБ-приближение». — Москва: Мир, 1967.
5. Брандт Н.Б. и Кульбачинский В.А. «Квазичастицы в физике конденсированного состояния». — Москва: Физматлит, 2005.

7. Материально-техническое обеспечение дисциплины
Ресурсы учебных аудиторий и лабораторий ННГУ и ИФМ РАН.

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО – магистратура по направлению подготовки 03.04.03 Радиофизика, утвержденного приказом Министерства науки и высшего образования РФ от 7 августа 2020 г. N 918.

Автор (ы) д.ф.-м.н. профессор А .Ю. Аладышкин

Заведующий кафедрой д.ф.-м.н. профессор З.Ф. Красильник

Программа одобрена на заседании методической комиссии радиофизического факультета от «25» мая 2023 года, протокол № 04/23