

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
ученого совета ННГУ
протокол № 13 от 30.11.2022 г

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

Квантовая радиофизика и лазерная физика

(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 квантовой радиофизики, лазерной физики и фотоники при решении задач своей профессиональной деятельности	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 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	<i>Знать:</i> основы теории рассеяния в квантовой механике; основы теории туннельного эффекта в задачах физики твердого тела; методы расчета вольтамперных характеристик туннельно-связанных систем; принципы работы эмиссионного и сканирующего туннельного микроскопа; связь туннельной проводимости и локальной плотности состояний. <i>Уметь</i> пользоваться законами квантовой механики для расчета коэффициентов отражения и прохождения волн в неоднородном потенциале, рассчитывать вольтамперные характеристики туннельно-связанных систем. <i>Владеть</i> навыками решения задач, основанных на полученных в ходе освоения дисциплины знаниях.	<i>Собеседование, задача</i>
ПК-2. Способен выполнять теоретические и экспериментальные	ПК-2.1. Анализирует современное состояние исследований в	<i>Уметь</i> применять полученные знания при проведении научных исследований в избранной области. <i>Владеть</i> основными методами	<i>Собеседование, задача</i>

исследования и разработки по отдельным разделам тем научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в области квантовой радиофизики, лазерной физики и фотоники и оформлять их результаты	области квантовой радиофизики, лазерной физики и фотоники, современные подходы к описанию и моделированию различных физических явлений и оценке полученных результатов ПК-2.2. Выбирает и применяет аналитические, аналитико-численные, экспериментальные методы исследования в соответствии с типом поставленной задачи ПК-2.3. Участвует в планировании, подготовке и проведении НИР ПК-2.4. Анализирует полученные данные, формулирует выводы и рекомендации по отдельным разделам тем в области квантовой радиофизики, лазерной физики и фотоники	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	32
- занятия семинарского типа	

(практические занятия / 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							

Практические занятия /лабораторные работы организуются, в том числе, в форме практической подготовки, которая предусматривает участие обучающихся в выполнении отдельных элементов работ, связанных с будущей профессиональной деятельностью.

На проведение практических занятий / лабораторных работ в форме практической подготовки отводится: очная форма обучения - 4 ч.

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 несущественными 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	При решении стандартных задач не продемонстрированы базовые	Имеется минимальный набор навыков для решения	Продemonстрированы базовые навыки при решении стандартных	Продemonстрированы базовые навыки при решении стандартных	Продemonстрированы навыки при решении нестандартных задач без	Продemonстрирован творческий подход к решению нестандартных

	вследствие отказа обучающегося от ответа	навыки. Имели место грубые ошибки.	стандартных задач с некоторыми недочетами	задач с некоторыми недочетами	задач без ошибок и недочетов.	ошибок и недочетов.	ых 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 характеристика 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

Задача 1.1. Используя явный вид волновых функций состояний рассеяния

$$\psi_E(z) = \begin{cases} \frac{a_1}{\sqrt{2\pi\hbar v_1}} e^{ik_1 z} + \frac{b_1}{\sqrt{2\pi\hbar v_1}} e^{-ik_1 z} & (z \rightarrow -\infty) \\ \frac{a_2}{\sqrt{2\pi\hbar v_2}} e^{ik_2 z} + \frac{b_2}{\sqrt{2\pi\hbar v_2}} e^{-ik_2 z} & (z \rightarrow +\infty) \end{cases},$$

покажите, что слева от барьера плотность потока вероятности есть $\Pi = (a_1^2 - b_1^2)/(2\pi\hbar v_1)$, а справа от барьера – $\Pi = (a_2^2 - b_2^2)/(2\pi\hbar v_2)$.

Задача 1.2. Используя общий вид матрицы рассеяния для случая одноканального рассеяния

$$\hat{S} = \begin{pmatrix} r & t' \\ t & r' \end{pmatrix},$$

покажите, что трансфер-матрица в этом случае может быть записана в следующем виде

$$\hat{M} = \begin{pmatrix} t^{-1} & -t^{-1}r' \\ rt^{-1} & t' - rt^{-1}r' \end{pmatrix}.$$

5.2.4. Типовые задания/задачи для оценки сформированности компетенции ПК-2

Задача 2.1. Используя выражение для средней свободной энергии системы попарно-коррелированных электронов

$$E = \sum_k 2\varepsilon_k |v_k|^2 + \sum_k V_{k,k'} u_k v_k^* u_{k'}^* v_{k'}$$

определите зависимости факторов когерентности u_k и v_k от волнового вектора в состоянии термодинамического равновесия.

Задача 2.2. Используя выражение для спектра квазичастичных возбуждений $E_k = \sqrt{\varepsilon_k^2 + \Delta_k^2}$, рассчитайте плотность состояний квазичастичных возбуждений.

6. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

а) основная литература:

1. Бурштейн Э., Лундквист С., «Туннельные явления в твердых телах». — М., 1973. — 3 экз.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М., «Квантовая механика (нерелятивистская теория)». — М.: Физматлит, 2016. Постоянная ссылка на документ: <http://znanium.com/catalog/document?id=369173>
3. Демиховский В.Я., Вугальтер Г.А., «Физика квантовых низкоразмерных структур». — М: Логос, 2000. — 3 экз.
4. Абрикосов А.А., «Основы теории металлов». — М.: Физматлит, 2010. Постоянная ссылка на документ: <https://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785922110976.html>
5. Солимар Л. «Туннельный эффект в сверхпроводниках и его применение». — Москва: Мир, 1974. — 4 экз.

б) дополнительная литература:

1. Блохинцев Д.И., «Основы квантовой механики». — М.: Наука, 1976. — 86 экз.
2. Бом Д., «Квантовая теория» — М.: Наука, 1965. — 4 экз.
3. Галицкий В.М., Карнаков Б.М. и Коган В.И. «Задачи по квантовой механике». — Москва: Наука, 1981. — 44 экз.

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 «14» ноября 2022 года, протокол № 08/22.