

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

---

УТВЕРЖДЕНО

решением президиума Ученого совета ННГУ

протокол № 1 от 16.01.2024 г.

**Рабочая программа дисциплины**

Туннельные явления в нанофизике

---

Уровень высшего образования

Магистратура

---

Направление подготовки / специальность

11.04.04 - Электроника и наноэлектроника

---

Направленность образовательной программы

Твердотельная электроника и наноэлектроника

---

Форма обучения

очная

---

г. Нижний Новгород

2024 год начала подготовки

## 1. Место дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина Б1.В.ДВ.02.01 Туннельные явления в нанофизике относится к части, формируемой участниками образовательных отношений образовательной программы.

## 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	Для текущего контроля успеваемости	Для промежуточной аттестации
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	<p>ПК-4.1: Знает тенденции и перспективы развития электроники и нанoeлектроники, а также смежных областей науки и техники</p> <p>ПК-4.2: Способен рассчитывать предельно допустимые и предельные режимы работы изделий микро- и нанoeлектроники</p> <p>ПК-4.3: Имеет навыки обоснованного выбора теоретических и экспериментальных методов исследования изделий микро- и нанoeлектроники</p>	<p>ПК-4.1: 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.</p> <p>ПК-4.2: 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-</p>	Задачи	Экзамен: Контрольные вопросы

		<p>амперные характеристики систем с туннельной связью.</p> <p>ПК-4.3: Владеть навыками решения задач, основанных на полученных в ходе освоения дисциплины знаниях.</p>		
--	--	--	--	--

### 3. Структура и содержание дисциплины

#### 3.1 Трудоемкость дисциплины

	очная
<b>Общая трудоемкость, з.е.</b>	<b>3</b>
<b>Часов по учебному плану</b>	<b>108</b>
в том числе	
<b>аудиторные занятия (контактная работа):</b>	
- занятия лекционного типа	<b>16</b>
- занятия семинарского типа (практические занятия / лабораторные работы)	<b>16</b>
- КСР	<b>2</b>
<b>самостоятельная работа</b>	<b>38</b>
<b>Промежуточная аттестация</b>	<b>36</b> <b>Экзамен</b>

#### 3.2. Содержание дисциплины

(структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий)

Наименование разделов и тем дисциплины	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 (практические занятия/лабораторные работы), часы	Всего	
	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0
Введение в спецкурс. Задача рассеяния в квантовой механике. Точные решения	12	2	4	6	6
Квазиклассическое описание туннелирования	10	2	2	4	6
Квазистационарные состояния в квантовой механике	10	2	2	4	6
Метод туннельного гамильтониана	8	2	2	4	4
Особенности туннельного эффекта в системе нормальных металлов	14	4	2	6	8
Особенности туннельного эффекта в системе нормальных металлов	8	2	2	4	4
Особенности туннельного эффекта в системе сверхпроводящих металлов					

Особенности туннельного эффекта в системе ферромагнитных металлов	8	2	2	4	4
Аттестация	36				
КСР	2			2	
Итого	108	16	16	34	38

### Содержание разделов и тем дисциплины

Введение в спецкурс. Задача рассеяния в квантовой механике. Точные решения  
 Квазиклассическое описание туннелирования  
 Квазистационарные состояния в квантовой механике  
 Метод туннельного гамильтониана  
 Особенности туннельного эффекта в системе нормальных металлов  
 Особенности туннельного эффекта в системе сверхпроводящих металлов  
 Особенности туннельного эффекта в системе ферромагнитных металлов

#### 4. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся

Самостоятельная работа обучающихся включает в себя подготовку к контрольным вопросам и заданиям для текущего контроля и промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины приведенным в п. 5.

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](https://ufn.ru/ru/articles/2011/10/b/свободный%20доступ).

в) программное обеспечение и Интернет-ресурсы (в соответствии с содержанием дисциплины)  
 Журнальный портал ФТИ им. А.Ф. Иоффе <http://journals.ioffe.ru/>.

#### 5. Фонд оценочных средств для текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)

5.1 Типовые задания, необходимые для оценки результатов обучения при проведении текущего контроля успеваемости с указанием критериев их оценивания:

### 5.1.1 Типовые задания (оценочное средство - Задачи) для оценки сформированности компетенции ПК-4:

#### 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  $T=0$

### Критерии оценивания (оценочное средство - Задачи)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	Обучающийся продемонстрировал изложение формулировок основных теоретических положений курса и успешно показал умения и навыки выполнения практических заданий базового уровня сложности
не зачтено	Обучающийся не продемонстрировал представления об основных теоретических разделах курса, не показал минимально допустимый уровень умений и навыков выполнения практических заданий.

### 5.2. Описание шкал оценивания результатов обучения по дисциплине при промежуточной аттестации

#### Шкала оценивания сформированности компетенций

Уровень сформированности компетенций (индикатора достижения 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. Ошибок нет.	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 и 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 базовых навыков. 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 оценивания при промежуточной аттестации

Оценка		Уровень подготовки
зачтено	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

	<b>отлично</b>	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «отлично».
	<b>очень хорошо</b>	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «очень хорошо»
	<b>хорошо</b>	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «хорошо».
	<b>удовлетворительно</b>	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»
<b>не зачтено</b>	<b>неудовлетворительно</b>	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «неудовлетворительно».
	<b>плохо</b>	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «плохо»

### 5.3 Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения на промежуточной аттестации с указанием критериев их оценивания:

#### 5.3.1 Типовые задания (оценочное средство - Контрольные вопросы) для оценки сформированности компетенции ПК-4

- 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).

#### Критерии оценивания (оценочное средство - Контрольные вопросы)

Оценка	Критерии оценивания
превосходно	Уровень знаний в объеме, превышающем программу подготовки. Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном объеме без недочетов. Продемонстрирован творческий подход к решению нестандартных задач.
отлично	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки, без ошибок. Продемонстрированы все основные умения, решены все основные задачи с отдельными несущественными недочетами, выполнены все задания в полном объеме. Продемонстрированы навыки при решении нестандартных задач без ошибок и недочетов.
очень хорошо	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько несущественных ошибок. Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном объеме, но некоторые с недочетами. Продемонстрированы базовые навыки при решении стандартных задач без ошибок и недочетов
хорошо	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько негрубых ошибок. Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, в полном объеме, но некоторые с недочетами. Продемонстрированы базовые навыки при решении стандартных задач с некоторыми недочетами.
удовлетворительно	Минимально допустимый уровень знаний. Допущено много негрубых ошибки. Продемонстрированы основные умения. Решены типовые задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания но не в полном объеме. Имеется минимальный набор навыков для решения стандартных задач с некоторыми недочетами.
неудовлетворительно	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имели место грубые ошибки. При решении стандартных задач не продемонстрированы основные умения. Имели место грубые ошибки. При решении стандартных задач не продемонстрированы базовые навыки. Имели место грубые ошибки.
плохо	Отсутствие знаний теоретического материала. Невозможность оценить полноту знаний вследствие отказа обучающегося от ответа. Отсутствие минимальных умений . Невозможность оценить наличие умений вследствие отказа обучающегося от ответа. Отсутствие владения материалом. Невозможность оценить наличие навыков вследствие отказа обучающегося от ответа

## 6. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины (модуля)

Основная литература:



1. Блохинцев Д. И. Основы квантовой механики : [учеб. пособие для вузов]. - 6-е изд., стер. - М. : Наука, 1983. - 664 с. : ил. - 1.60., 15 экз.
2. Галицкий Виктор Михайлович. Задачи по квантовой механике : [учеб. пособие для физ. специальностей вузов]. - 2-е изд., перераб. и доп. - М. : Наука, 1992. - 878, [2] с. : ил. - ISBN 5-02-014365-0 (в пер.) : 62.50., 6 экз.

Дополнительная литература:

1. Демиховский Валерий Яковлевич. Физика квантовых низкоразмерных структур / В. Я. Демиховский, Г. А. Вугальтер. - М. : Логос, 2000. - 248 с. : ил. - ISBN 5-88439-045-9 : 25.00., 3 экз.
2. Солимар Л. Туннельный эффект в сверхпроводниках и его применение / пер. с англ. А. Ф. Волкова и Э. М. Эпштейна. - М. : Мир, 1974. - 428 с. : с черт. - 2.74., 4 экз.
3. Фреман Н. ВКБ-приближение / пер. с англ. Б. А. Лысова ; под ред. А. А. Соколова. - М. : Мир, 1967. - 168 с. : черт. - 0.57., 2 экз.

Программное обеспечение и Интернет-ресурсы (в соответствии с содержанием дисциплины):

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

## **7. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)**

Учебные аудитории для проведения учебных занятий, предусмотренных образовательной программой, оснащены мультимедийным оборудованием (проектор, экран), техническими средствами обучения, компьютерами, специализированным оборудованием: Учебные аудитории для проведения учебных занятий, предусмотренных образовательной программой, оснащены мультимедийным оборудованием (проектор, экран), техническими средствами обучения, компьютерами, специализированным оборудованием: 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. Помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет" и обеспечены доступом в электронную информационно-образовательную среду.

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 ОС ННГУ по направлению подготовки/специальности 11.04.04 - Электроника и наноэлектроника.

Автор(ы): Аладышкин Алексей Юрьевич, доктор физико-математических наук.

Заведующий кафедрой: Павлов Дмитрий Алексеевич, доктор физико-математических наук.

Программа одобрена на заседании методической комиссии от 09.01.2024, протокол № б/н.