

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  
«31» мая 2023 г. №6

**Рабочая программа дисциплины**

Теория низкоразмерных систем

(наименование дисциплины (модуля))

Уровень высшего образования

бакалавриат

(бакалавриат / магистратура / специалитет)

Направление подготовки / специальность

03.03.02 Физика

(указывается код и наименование направления подготовки / специальности)

Направленность образовательной программы

профиль "Теоретическая физика"

(указывается профиль / магистерская программа / специализация)

Квалификация (степень)

бакалавр

(бакалавр / магистр / специалист)

Форма обучения

очная

(очная / очно-заочная / заочная)

Год начала обучения

2022

(для обучающихся какого года начала обучения разработана Рабочая программа)

Нижний Новгород

## 1. Место и цели дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина «Теория низкоразмерных систем» относится к вариативной части Б1.В блока Б1 «Дисциплины (модули)», является обязательной для освоения, преподается на четвертом году обучения, в восьмом семестре. Освоению дисциплины предшествует освоение дисциплин (модулей) «Теоретическая физика», «Теория полупроводников».

Целями освоения дисциплины «Теория низкоразмерных систем» являются:

- овладение основными положениями современной квантовой теории низкоразмерных структур, а также понимание физических механизмов протекания в них транспортных, оптических и других процессов;
- освоение студентами методов расчета квантовых состояний и параметров, описывающих протекание различных физических процессов в низкоразмерных системах;
- выработка у студентов практических навыков решения различных задач с полупроводниковыми наноструктурами как при использовании аналитических расчётов, так и с применением современных компьютерных технологий.

## 2. Структура и содержание дисциплины

Объем дисциплины «Теория низкоразмерных систем» составляет 3 зачетных единицы, всего 108 часов, из которых 27 часов составляет контактная работа обучающегося с преподавателем (1 час – мероприятия промежуточной аттестации; 26 часов занятия семинарского типа (практические занятия), в том числе 2 часа – мероприятия текущего контроля успеваемости), 81 час составляет самостоятельная работа обучающегося в течение семестра.

Содержание дисциплины «Теория низкоразмерных систем»

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины	Всего (часы)	В ТОМ ЧИСЛЕ				Самостоятельная работа в течение семестра, часы
		контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем) в течение семестра, часы, из них				
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Занятия лабораторного типа	Всего	
<b>1. Квантовые состояния и туннелирование в низкоразмерных структурах.</b> Размерное квантование. Основные типы квантоворазмерных структур. Плотность состояний в низкоразмерных системах. Коэффициент туннелирования через прямоугольный барьер. Структура с двойной квантовой ямой. Квантовые состояния мелких примесей и экситонов в гетероструктурах. Туннелирование через двухбарьерную структуру. Резонансный коэффициент прохождения. Резонансный туннельный диод и его вольтамперная характеристика.	17	—	4	—	4	13
<b>2. Сверхрешётки.</b> Полупроводниковые сверхрешётки, энергетические минизоны и блоховские волновые функции. Сверхрешётка в постоянном электрическом поле. Частота Штарка. Расчёт вольтамперной характеристики сверхрешетки в постоянном электрическом поле.	17	—	4	—	4	13
<b>3. Оптические свойства наноструктур.</b> Коэффициент поглощения света для межзонных переходов в объёмном полупроводнике и в гетероструктуре с квантовой ямой. Коэффициент поглощения света для внутризонных переходов в гетероструктуре с квантовой ямой.	17	—	4	—	4	13
<b>4. Транспорт в мезоскопических структурах.</b>	18	—	4	—	4	14

Мезоскопические структуры. Кондактанс баллистического проводника. Формула Ландауэра. Локализация квантовых состояний в одномерной системе рассеивателей.						
<b>5. Кулоновская блокада туннелирования.</b> Понятие об эффекте кулоновской блокады туннелирования. Расчёт сопротивления туннельного контакта. Вычисление кондактанса туннельного контакта с затвором в рамках решения кинетического уравнения.	18	—	5	—	5	14
<b>6. Квантовый эффект Холла.</b> Физическая сущность квантового эффекта Холла. Холловская проводимость одного уровня Ландау. Учет локализованных состояний при расчете холловской проводимости. Физические основы дробного квантового эффект Холла.	18	—	5	—	5	14
<b>В т.ч. текущий контроль</b>	2	2				—
Промежуточная аттестация — зачет						

### 3. Образовательные технологии

- 1) методика «вопросы и ответы»;
- 2) выполнение практического задания у доски;
- 3) индивидуальная работа над практическим заданием;
- 4) работа в парах над практическим заданием;
- 5) работа в малых группах над практическим заданием;
- 6) методика «мозговой штурм».

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

Самостоятельная работа обучающихся предполагает изучение выделенных разделов основной литературы, а также дополнительной литературы, выполнение практических заданий, отвечающих изучаемым разделам дисциплины, подготовку устного доклада на предложенную тему.

Перечень основной и дополнительной литературы для самостоятельного изучения приведен в п. 7 настоящей Рабочей программы дисциплины.

Контрольные вопросы для промежуточной аттестации, примеры практических заданий, примеры тем для устного доклада приведены в п. 6.3 настоящей Рабочей программы дисциплины.

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

Формируемые компетенции	Планируемые результаты обучения по дисциплине
ПК-1 способность использовать специализированные знания в области физики для освоения профильных физических дисциплин	(ПК-1) <b>Знать</b> основные разделы теории низкоразмерных систем, формирующие фундаментальную научно-образовательную базу физики. (ПК-1) <b>Уметь</b> решать типовые и нестандартные задачи по физике, требующие применения аппарата теории низкоразмерных систем. (ПК-1) <b>Владеть</b> навыками постановки и решения основных типов задач теории низкоразмерных систем, требующимися для моделирования профильных задач физики.

## 6. Фонд оценочных средств для промежуточной аттестации по дисциплине

### 6.1. Описание шкал оценивания результатов обучения по дисциплине

Промежуточной аттестацией для дисциплины «Теория низкоразмерных систем» является **зачет**.

По итогам зачета выставляется оценка «Зачтено» или «Не зачтено». Оценка «Не зачтено» означает отсутствие аттестации, оценка «Зачтено» выставляется 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);
- устный доклад (публичное выступление) на заданную тему (промежуточная аттестация).

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

- выполнение практических заданий (текущий контроль, промежуточная аттестация);
- устный доклад (публичное выступление) на заданную тему (промежуточная аттестация).

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

- выполнение практических заданий (текущий контроль, промежуточная аттестация);
- дискуссия по теме устного доклада (публичного выступления) на заданную тему (промежуточная аттестация).

Контрольные вопросы для индивидуального собеседования, примеры тем для устного доклада, 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.

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

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

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

6.3.1. При проведении промежуточной аттестации обучающимся предлагаются следующие контрольные вопросы, охватывающие программу дисциплины «Теория низкоразмерных систем»:

1. Размерное квантование. Основные типы квантоворазмерных структур. Плотность состояний в низкоразмерных системах.
2. Коэффициент туннелирования через прямоугольный барьер. Структура с двойной квантовой ямой.
3. Квантовые состояния мелких примесей и экситонов в гетероструктурах.
4. Туннелирование через двухбарьерную структуру. Резонансный коэффициент прохождения.
5. Резонансный туннельный диод и его вольтамперная характеристика.
6. Полупроводниковые сверхрешётки, энергетические минизоны и блоховские волновые функции.
7. Сверхрешётка в постоянном электрическом поле. Частота Штарка.

8. Вольтамперная характеристика сверхрешетки в постоянном электрическом поле.
9. Коэффициент поглощения света для межзонных переходов в гетероструктуре с квантовой ямой.
10. Коэффициент поглощения света для внутризонных переходов в гетероструктуре с квантовой ямой.
11. Мезоскопические структуры. Кондактанс баллистического проводника. Формула Ландауэра.
12. Локализация квантовых состояний в одномерной системе рассеивателей.
13. Кулоновская блокада туннелирования. Сопротивление туннельного контакта.
14. Кулоновская блокада туннелирования. Кондактанс туннельного контакта с затвором.
15. Квантовый эффект Холла. Холловская проводимость одного уровня Ландау.
16. Квантовый эффект Холла. Учет локализованных состояний при расчете холловской проводимости.
17. Физические основы дробного квантового эффекта Холла.

#### 6.3.2. Примеры тем для устного доклада (публичного выступления):

1. Дырочные состояния в гетероструктурах.
2. Сверхрешётка в высокочастотном электрическом поле.
3. Гамильтонианы с периодической зависимостью от времени.
4. Спин-орбитальное взаимодействие в низкоразмерных структурах.
5. Различные подходы к описанию квантового эффекта Холла.
6. Блоховские электроны в магнитном поле.
7. Спиновый эффект Холла.
8. Основные свойства топологических изоляторов.

#### 6.3.3. Примеры практических заданий для практических занятий, самостоятельной работы обучающихся, проведения текущего контроля и промежуточной аттестации:

1. Провести расчёт квантовых состояний в одномерной прямоугольной потенциальной яме для случая, когда эффективная масса частицы различна внутри и вне ямы. Как влияет различие эффективных масс на положение основного уровня?
2. Найти плотность состояний в объёмном полупроводнике, в двумерном электронном газе, и в одномерной квантовой проволоке.
3. Используя правило Андерсена, нарисовать зонную диаграмму при комнатной температуре для гетероструктуры  $p - \text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As} - n - \text{GaAs}$ .
4. Пусть в двухбарьерной структуре имеется два квазистационарных уровня с энергиями  $E_0$  и  $E_1$ , причём выполнены

условия  $E_0 > \mu$  и  $E_1 - E_0 > \mu$ , где  $\mu$  – уровень Ферми в эмиттере. Считая, что падение напряжения на обоих барьерах одно и то же, нарисуйте качественно вольтамперную характеристику такого резонансно-туннельного диода.

5. Прямоугольная квантовая яма такова, что в ней существуют два связанных состояния электрона с энергиями  $E_0$  и  $E_1$ . Периодическая последовательность таких ям образует сверхрешётку. Покажите, что параметр  $\Delta_k$  в законе дисперсии  $E_k(\mathbf{p}) = \frac{p_y^2 + p_z^2}{2m} + E_k - \frac{\Delta_k}{2} \cos \frac{p_x d}{\hbar}$  положителен для  $k = 0$  и отрицателен для  $k = 1$ .

6. Используя асимптотические выражения для модифицированных функций Бесселя, определить, каким образом повлияет повышение температуры на вольтамперную характеристику сверхрешётки с простейшим периодическим законом дисперсии.

7. Определить частотную зависимость коэффициента поглощения света, обусловленного переходами электронов из полностью заполненной основной дырочной подзоны размерного квантования в свободные состояния непрерывного спектра в зоне проводимости для гетероструктуры с квантовой ямой. Считать дырочные уровни глубокими.

#### 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

#### а) основная литература:

1. В.Я. Демиховский, Г.А. Вугальтер, Физика квантовых низкоразмерных структур. – М.: Логос. – 2000. – 248 с. Фонд Фундаментальной библиотеки ННГУ: 4 экз.

<http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=38775>.

2. В.П. Драгунов, И.Г. Неизвестный, В.А. Гридчин, Основы нанoeлектроники. – Новосибирск: Изд-во НГТУ. – 2000. – 332 с. Фонд Фундаментальной библиотеки ННГУ: 7 экз.

<http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=246687>.

3. А.Я. Шик, Л.Г. Бакуева, С.Ф. Мусихин, С.А. Рыков, Физика низкоразмерных систем. – Санкт-Петербург. – 2001. – 160 с. Фонд Фундаментальной библиотеки ННГУ: 5 экз.

<http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=44367>.



4. С. Датта, Квантовый транспорт: от атома к транзистору. – М.-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика». – 2009. – 532 с. Фонд Фундаментальной библиотеки ННГУ: 5 экз.  
<http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=417189>.
5. Г.А. Вугальтер, В.А. Бурдов, Полупроводниковые сверхрешётки. Физические основы современной электроники. Методические указания к специальному курсу. Часть 2. – Н. Новгород: ННГУ. – 1999. – 56 с.  
[http://www.unn.ru/books/met\\_files/lattice.zip](http://www.unn.ru/books/met_files/lattice.zip).

**б) дополнительная литература:**

1. В.Я. Демиховский, Низкоразмерные структуры спинтроники: курс лекций. – Н. Новгород: Изд-во Нижегород. гос. ун-та. – 2007. – 126 с. Фонд Фундаментальной библиотеки ННГУ: 2 экз.  
<http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=449220>.
2. Т. Андо, А. Фаулер, Ф. Стерн, Электронные свойства двумерных систем. – М.: Мир. – 1985. – 416 с. Фонд Фундаментальной библиотеки ННГУ, 3 экз.  
<http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=75114>.

**в) программное обеспечение и Интернет-ресурсы:**

- 1) пакеты символьной математики Wolfram Mathematica и MathWorks MATLAB;
- 2) Интернет-ресурсы Фундаментальной библиотеки ННГУ  
<http://www.lib.unn.ru/>.

## **8. Материально-техническое обеспечение дисциплины**

Материально-техническое обеспечение дисциплины обусловлено наличием учебных аудиторий для проведения занятий, оборудованных специализированной мебелью, меловыми или магнитно-маркерными досками для представления учебной информации большой аудитории. Ресурс мела и маркеров для доски в учебных аудиториях регулярно возобновляется.

Учебные аудитории могут быть при необходимости оснащены демонстрационным оборудованием для сопровождения учебных занятий презентациями.

ННГУ обеспечен всем необходимым программным обеспечением для проведения практических занятий, связанных с работами на персональных компьютерах.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся (на базе Фундаментальной библиотеки ННГУ) оснащены компьютерной техникой с подключением к сети «Интернет» и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду ННГУ.

Программа составлена в соответствии с требованиями федерального государственного образовательного стандарта высшего образования по направлению подготовки 03.03.02 Физика.

Автор:

доцент кафедры теоретической физики

физического факультета,

к. ф.-м. н., доцент \_\_\_\_\_ / Хомицкий Д.В. /

Рецензент:

Зав. кафедрой теоретической физики

физического факультета,

д. ф.-м. н., доцент \_\_\_\_\_ / Бурдов В.А. /

Программа одобрена на заседании Учебно-методической комиссии  
физического факультета ННГУ от «        » \_\_\_\_\_ 2021 года,  
протокол № б/н.

Председатель

Учебно-методической комиссии

физического факультета ННГУ \_\_\_\_\_ / Перов А.А. /