

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 Ученого совета ННГУ
протокол № 10 от 02.12.2024 г.

Рабочая программа дисциплины

Теория низкоразмерных систем

Уровень высшего образования
Бакалавриат

Направление подготовки / специальность
03.03.02 - Физика

Направленность образовательной программы
Физика конденсированного состояния

Форма обучения
очная

г. Нижний Новгород

2025 год начала подготовки

1. Место дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина Б1.В.1.ДВ.02.01.03 Теория низкоразмерных систем 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
<i>ПК-1: Способен использовать специализированные знания в области физики для освоения профильных физических дисциплин</i>	<i>ИД ПК-1: Демонстрация способности использовать специализированные знания в области физики для освоения профильных физических дисциплин</i>	<i>ИД ПК-1: Знание материала основных разделов теории низкоразмерных систем для освоения профильных физических дисциплин</i>	<i>Задачи</i>	<i>Экзамен: Контрольные вопросы Доклад-презентация</i>

3. Структура и содержание дисциплины

3.1 Трудоемкость дисциплины

	очная
Общая трудоемкость, з.е.	4
Часов по учебному плану	144
в том числе	
аудиторные занятия (контактная работа):	
- занятия лекционного типа	26
- занятия семинарского типа (практические занятия / лабораторные работы)	26
- КСР	2
самостоятельная работа	54
Промежуточная аттестация	36 Экзамен

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	Самостоятельная

	взаимодействи с преподавателем), часы из них				работа обучающегося, часы
	Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа (практические занятия/ лабора торные работы), часы	Всего		
			о ф о	о ф о	
1. Квантовые состояния и туннелирование.	14	4	4	8	6
2. Резонансное туннелирование.	10	2	2	4	6
3. Полупроводниковые сверхрешётки.	8	2	2	4	4
4. Оптические свойства наноструктур.	10	2	2	4	6
5. Транспорт в мезоскопических структурах.	10	2	2	4	6
6. Кулоновская блокада туннелирования.	10	4	2	6	4
7. Квантовый эффект Холла.	14	4	2	6	8
8. Спин-орбитальное взаимодействие в полупроводниковых структурах.	12	2	4	6	6
9. Элементы теории топологических изоляторов	18	4	6	10	8
Аттестация	36				
КСР	2			2	
Итого	144	26	26	54	54

Содержание разделов и тем дисциплины

1. Квантовые состояния и туннелирование в низкоразмерных структурах. 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.
2. Резонансное туннелирование. Туннелирование через двухбарьерную структуру. Резонансный коэффициент прохождения. Квазистационарные состояния. Резонансный туннельный диод и его вольтамперная характеристика.
3. Полупроводниковые сверхрешётки. Волновые функции и зонный спектр. Сверхрешётка в постоянном электрическом поле. Частота Штарка. Расчёт вольтамперной характеристики сверхрешетки в постоянном электрическом поле.
4. Оптические свойства наноструктур. 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.
5. Транспорт в мезоскопических структурах. Кондактанс баллистического проводника. Формула Ландауэра. Локализация квантовых состояний в одномерной системе рассеивателей.
6. Кулоновская блокада туннелирования. Понятие об эффекте кулоновской блокады туннелирования. Расчёт сопротивления туннельного контакта. Вычисление кондактанса туннельного контакта с затвором в рамках решения кинетического уравнения.
7. Квантовый эффект Холла. Физическая сущность квантового эффекта Холла. Холловская проводимость одного уровня Ландау. Учет локализованных состояний при расчете холловской проводимости. Физические основы дробного квантового эффект Холла.
8. Спин-орбитальное взаимодействие в полупроводниковых структурах. Вклады Дрессельхауза и Рашбы. Структура спектра, спинорных волновых функций и спиновой поляризации в k-пространстве.
9. Элементы теории топологических изоляторов. Место топологических изоляторов среди твердотельных структур и их отличительные свойства. Модель Берневига-Хьюза-Жанга для двумерного

газа в квантовой яме HgTe/CdTe с инвертированным спектром. Принципы расчёта краевых состояний в модели Берневига-Хьюза-Жанга. Зарядовый и спиновый транспорт. Основы методов расчёта топологических инвариантов.

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.

1. 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
2. Д.В. Хомицкий. Физические основы методов управления спиновой плотностью в наноструктурах спинтроники: учебно-методическое пособие. Нижний Новгород: ННГУ им. Н. И. Лобачевского. – 2011. – 94 С. <http://e-lib.unn.ru/MegaPro/Web/SearchResult/ToPage/1>
3. Д.В. Хомицкий. Элементы теории топологических изоляторов: учебное пособие. Нижний Новгород: ННГУ им. Н. И. Лобачевского. – 2025. – 150 С.

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-1:

1. Провести расчёт квантовых состояний в одномерной прямоугольной потенциальной яме для случая, когда эффективная масса частицы различна внутри и вовне 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 $p\text{-Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As-n-GaAs}$.
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 μ – уровень Ферми в эмиттере. Считая, что падение напряжения на обоих барьерах одно и то же, нарисуйте качественно вольтамперную характеристику такого резонансно-туннельного диода.

Критерии оценивания (оценочное средство - Задачи)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	Обучаемый успешно решил задачу самостоятельно либо с незначительной помощью преподавателя
не зачтено	Обучаемый не справился с задачей даже с помощью преподавателя и не продемонстрировал знания основных теоретических положений, необходимых для её решения.

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	Продемонстрированы основные умения. Решены типовые задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, но не в полном объеме	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания в полном объеме, но некоторые с недочетами	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания в полном объеме, но некоторые с недочетами	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с отдельными несущественными недочетами, выполнены все задания в полном объеме	Продемонстрированы 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	При решении стандартных задач не продемонстрированы базовые навыки. Имели	Имеется минимальный набор навыков для решения	Продемонстрированы базовые навыки при решении стандартны	Продемонстрированы базовые навыки при решении стандартны	Продемонстрированы навыки при решении нестандарт	Продемонстрирован творческий подход к решению нестандартны

	вследствие отказа обучающегося от ответа	место грубые ошибки	стандартны х задач с некоторым и недочетами	х задач с некоторым и недочетами	х задач без ошибок и недочетов	ных задач без ошибок и недочетов	х 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
	отлично	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «отлично».
	очень хорошо	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «очень хорошо»
	хорошо	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «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».
	плохо	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-1

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 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.
18. Спин-орбитальное взаимодействие в полупроводниках. Вклады Дрессельхауза и Рашбы. Структура спектра и волновых функций.
19. Топологические изоляторы. Место топологических изоляторов среди твердотельных структур и их отличительные свойства.
20. Модель Берневига-Хьюза-Жанга для двумерного газа в квантовой яме HgTe/CdTe с инвертированным спектром.
21. Принципы расчёта краевых состояний в модели Берневига-Хьюза-Жанга.

Критерии оценивания (оценочное средство - Контрольные вопросы)

Оценка	Критерии оценивания
превосходно	Обучаемый правильно и в полном объёме ответил в полном объёме на вопрос в билете, а также на дополнительный вопрос повышенной трудности.
отлично	Обучаемый правильно и в полном объёме ответил в полном объёме на вопрос

Оценка	Критерии оценивания
	в билете, а также на дополнительный вопрос.
очень хорошо	Обучаемый правильно и в достаточно полном объёме ответил на вопрос в билете, но не ответил на дополнительный вопрос.
хорошо	Обучаемый с незначительными погрешностями и в достаточно полном объёме ответил на вопрос в билете.
удовлетворительно	Обучаемый с помощью преподавателя ответил на вопрос в билете.
неудовлетворительно	Обучаемый не смог ответить на вопрос в билете.
плохо	Обучаемый не смог ответить на вопрос в билете и не продемонстрировал каких-либо знаний по данному вопросу.

5.3.2 Типовые задания (оценочное средство - Доклад-презентация) для оценки сформированности компетенции ПК-1

1. Несимметричная квантовая яма.
2. Двойная квантовая яма.
3. Дырочные состояния в гетероструктурах.
4. Двумерный атом водорода.
5. Квазистационарные состояния в атомах и в гетероструктурах.
6. Сверхрешётка в высокочастотном электрическом поле.
7. Спиновый эффект Холла.
8. Квантовые состояния двумерных и трёхмерных топологических изоляторов в магнитном поле.

Критерии оценивания (оценочное средство - Доклад-презентация)

Оценка	Критерии оценивания
превосходно	Обучаемый в полном объёме раскрыл тему доклада, ответил на все вопросы по докладу, а также на дополнительный вопрос повышенной трудности.
отлично	Обучаемый в полном объёме раскрыл тему доклада, ответил на все вопросы по докладу.
очень хорошо	Обучаемый в полном объёме раскрыл тему доклада, ответил на большинство вопросов по докладу.
хорошо	Обучаемый в достаточном объёме раскрыл тему доклада, ответил на

Оценка	Критерии оценивания
	основные вопросы по докладу.
удовлетворительно	Обучаемый в минимальном объеме раскрыл тему доклада, ответил на некоторые вопросы по докладу.
неудовлетворительно	Обучаемый не раскрыл тему доклада и не ответил на вопросы по докладу.
плохо	Обучаемый не подготовил доклад и не ответил ни на один вопрос по предполагаемой теме доклада.

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

Основная 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. Драгунов Валерий Павлович. Основы нанoeлектроники : учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по специальности "Микроэлектроника и полупроводниковые приборы". - Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2000. - 332 с. - В надзаг.: Федеральная целевая программа "Государственная поддержка интеграции высшего образования и фундаментальной науки на 1997 - 2000 годы". - ISBN 5-7782-0281-4 : 33.00., 7 экз.
3. Физика низкоразмерных систем : учеб. пособие / под общ. ред. В. И. Ильина и А. Я. Шика. - СПб. : Наука, 2001. - 160 с. : ил. - (Новые разделы физики полупроводников). - Федер. целевая программа "Гос. поддержка интеграции высш. образования и фундам. науки". - ISBN 5-02-024966-1 : 20.00., 5 экз.

Дополнительная литература:

1. Демиховский Валерий Яковлевич. Низкоразмерные структуры спинтроники : курс лекций / ННГУ. - Н. Новгород : Изд-во Нижегород. гос. ун-та, 2007. - 126 с. - На обл. кн.: Приоритетные национальные проекты "Образование", Инновационная образовательная программа Нижегород. гос. ун-та им. Н. И. Лобачевского. - ISBN 978-5-91326-063-5 : 40.00., 2 экз.
2. Андо Т. Электронные свойства двумерных систем / пер. с англ. О. И. Лойко, А. Я. Шика ; под ред. Ю. В. Шморцева. - М. : Мир, 1985. - 415 с. : ил. - 6.30., 3 экз.

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

Не предусмотрено

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.

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 ФГОС ВО по направлению подготовки/специальности 03.03.02 - Физика.

Автор(ы): Хомицкий Денис Владимирович, кандидат физико-математических наук, доцент.

Заведующий кафедрой: Бурдов Владимир Анатольевич, доктор физико-математических наук.

Программа одобрена на заседании методической комиссии от 30.11.2024, протокол № б/н.