

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 № 6 от 31.05.2023 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

2023 год начала подготовки

1. Место дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина Б1.В.1.ДВ.07.01 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 |
| ПК-1: Способен использовать специализированные знания в области физики для освоения профильных физических дисциплин | ПК-1.1: Знать основные разделы теории низкоразмерных систем, формирующие фундаментальную научно-образовательную базу физики. ПК-1.2: Уметь решать типовые задачи по теории низкоразмерных систем. ПК-1.3: Владеть навыками постановки, решения и презентации основных типов задач теории низкоразмерных систем. | ПК-1.1: Знание материала основных разделов теории низкоразмерных систем, формирующих фундаментальную научно-образовательную базу физики. ПК-1.2: Демонстрация умений решения типовых задач по теории низкоразмерных систем. ПК-1.3: Демонстрация владения навыками для постановки, решения и презентации основных типов задач теории низкоразмерных систем. | Задачи | Экзамен: Контрольные вопросы Доклад-презентация |

3. Структура и содержание дисциплины

3.1 Трудоемкость дисциплины

| | |
|--|--------------|
| | очная |
| Общая трудоемкость, з.е. | 5 |
| Часов по учебному плану | 180 |
| в том числе | |
| аудиторные занятия (контактная работа): | |
| - занятия лекционного типа | 26 |
| - занятия семинарского типа (практические занятия / лабораторные работы) | 26 |

| | |
|---------------------------------|-----------------------------|
| - КСР | 2 |
| самостоятельная работа | 90 |
| 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 и краткое содержание 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 | |
| | о ф о | о ф о | о ф о | о ф о | о ф о |
| 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. | 18 | 4 | 4 | 8 | 10 |
| 2. Резонансное туннелирование. Туннелирование через двухбарьерную структуру. Резонансный коэффициент прохождения. Квазистационарные состояния. Резонансный туннельный диод и его вольтамперная характеристика. | 20 | 4 | 4 | 8 | 12 |
| 3. Полупроводниковые сверхрешетки. Волновые функции и зонный спектр. Сверхрешетка в постоянном электрическом поле. Частота Штарка. Расчёт вольтамперной характеристики сверхрешетки в постоянном электрическом поле. | 14 | 2 | 2 | 4 | 10 |
| 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. | 16 | 2 | 2 | 4 | 12 |
| 5. Транспорт в мезоскопических структурах. Кондактанс баллистического проводника. Формула Ландауэра. Локализация квантовых состояний в одномерной системе рассеивателей. | 20 | 4 | 4 | 8 | 12 |
| 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. | 20 | 4 | 4 | 8 | 12 |
| 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. | 20 | 4 | 4 | 8 | 12 |
| 8. Спин-орбитальное взаимодействие в полупроводниковых структурах. Вклады Дрессельхауза и Рашбы. Структура спектра, спинорных волновых функций и спиновой поляризации в k-пространстве. | 14 | 2 | 2 | 4 | 10 |
| Аттестация | 36 | | | | |
| КСР | 2 | | | | 2 |
| Итого | 180 | 26 | 26 | 54 | 90 |

4. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся

1. Г.А. Вугальтер, В.А. Бурдов, Полупроводниковые сверхрешетки. 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>

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 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 $p\text{-Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As-n-GaAs}$.
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 (индикатор достижения) | плохо | неудовлетворительно | удовлетворительно | хорошо | очень хорошо | отлично | превосходно |
|---|------------|---------------------|-------------------|--------|--------------|---------|-------------|
| | не зачтено | | зачтено | | | | |

| ения компет енций) | | | | | | | |
|--------------------------|---|--|--|---|--|--|--|
| <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 отдельным 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 некоторым и недочетами | Продemonстрированы базовые навыки при решении стандартных задач с некоторым и 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 |
| | 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

5.3.1 Типовые задания, выносимые на промежуточную аттестацию:

Оценочное средство - Контрольные вопросы

Экзамен

Критерии оценивания (Контрольные вопросы - Экзамен)

| 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 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. |

Типовые задания (Контрольные вопросы - Экзамен) для оценки сформированности компетенции ПК-1 (Способен использовать специализированные знания в области физики для освоения профильных физических дисциплин)

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.

Оценочное средство - Доклад-презентация

Экзамен

Критерии оценивания (Доклад-презентация - Экзамен)

| Оценка | Критерии оценивания |
|---------------|---|
| превосходно | Обучаемый в полном объёме раскрыл тему доклада, ответил на все вопросы по докладу, а также на дополнительный вопрос повышенной трудности. |

| Оценка | Критерии оценивания |
|---------------------|---|
| отлично | Обучаемый в полном объеме раскрыл тему доклада, ответил на все вопросы по докладу. |
| очень хорошо | Обучаемый в полном объеме раскрыл тему доклада, ответил на большинство вопросов по докладу. |
| хорошо | Обучаемый в достаточном объеме раскрыл тему доклада, ответил на 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. |

Типовые задания (Доклад-презентация - Экзамен) для оценки сформированности компетенции ПК-1 (Способен использовать специализированные знания в области физики для освоения профильных физических дисциплин)

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. Основные свойства топологических изоляторов.

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 используется

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 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 20.05.2022, протокол № 6/н.