

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
« ____ » _____ 202_ г. № ____

Рабочая программа дисциплины

Дополнительные главы по физике полупроводников

(наименование дисциплины (модуля))

Уровень высшего образования

магистратура

(бакалавриат / магистратура / специалитет)

Направление подготовки / специальность

03.04.02 Физика

(указывается код и наименование направления подготовки / специальности)

Направленность образовательной программы

магистерская программа "Квантовые и нейроморфные технологии"

(указывается профиль / магистерская программа / специализация)

Квалификация (степень)

магистр

(бакалавр / магистр / специалист)

Форма обучения

очная

(очная / очно-заочная / заочная)

Год начала обучения

2023

(для обучающихся какого года начала обучения разработана Рабочая программа)

Нижний Новгород

1. Место и цели дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина «Дополнительные главы по физике полупроводников» относится к блоку ФТД «Факультативы», является факультативной дисциплиной, преподается на первом году обучения, во втором семестре.

Целями освоения дисциплины являются:

- формирование у студентов представления о современном состоянии физики полупроводников, о современных достижениях в формировании;
- формирование у студентов представления о современных достижениях в создании и изучении свойств низкоразмерных полупроводниковых систем и приборах на их основе, а также теоретических методах описания свойств этих систем;
- формирование у студентов общепрофессиональных и профессиональных компетенций в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки 03.04.02 «Физика».

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

Формируемые компетенции	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), характеризующие этапы формирования компетенций
ПК-3 Способен свободно владеть разделами физики и применять результаты научных исследований в профильных областях для решения научно-практических и научно-технологических задачи	31 (ПК-3) Знать основные свойства низкоразмерных полупроводниковых систем и основные модели для их описания. У1 (ПК-3) Уметь использовать новейшие достижения в современной физике полупроводников в теоретической и экспериментальной научно-исследовательской работе. В1 (ПК-3) Владеть практическими методами решения задач физики полупроводников.

3. Структура и содержание дисциплины

Объем дисциплины составляет 2 зачетные единицы, всего 72 часа, из которых 34 часа составляет контактная работа обучающегося с преподавателем (16 часов занятия лекционного типа, 16 часов занятия семинарского типа, 2 часа мероприятия промежуточной аттестации), 38 часов составляет самостоятельная работа обучающегося.

Содержание дисциплины (модуля)

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины, форма промежуточной аттестации по дисциплине	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	Занятия лабораторного типа	Всего	
<u>Тема 1</u> Модель Кейна и её использование для описания зонного спектра полупроводников	10	2	2		4	6
<u>Тема 2</u> Гетеропереходы. Квантовые ямы, квантовые провода, квантовые точки. Графен.	10	2	2		4	6
<u>Тема 3.</u> Оптические свойства низкоразмерных полупроводниковых систем.	11	2	2		4	7
<u>Тема 4.</u> Полупроводниковые лазеры. Квантово-каскадные лазеры. Полупроводниковые модуляторы и детекторы на квантовых ямах	15	4	4		8	7
<u>Тема 5.</u> Основные свойства сверхрешеток. Резонансное туннелирование. Резонансно туннельный диод.	11	2	2		4	7
<u>Тема 6.</u> Квантовый эффект Холла. Основные представления об электронном спектре сильно легированных полупроводников	14	4	4		8	6
в т.ч.текущий контроль			2			
Промежуточная аттестация – зачет с оценкой					2	38

Текущий контроль успеваемости осуществляется в виде решений и последующей проверки домашних контрольных работ, а также в рамках занятий практического и семинарского типа, групповых и индивидуальных консультаций. Итоговый контроль осуществляется на зачёте с выставлением оценки.

4. Образовательные технологии

При изучении дисциплины используются современные образовательные технологии. Предусматривается широкое использование в учебном процессе активных и интерактивных форм проведения занятий (разбор конкретных ситуаций, тренинги по

решению практических задач) в сочетании с внеаудиторной работой с целью формирования и развития профессиональных навыков обучающихся.

Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем) по дисциплине проходит в форме лекций и практических занятий, а также в виде коллективных и индивидуальных консультаций. На занятиях лекционного типа используются мультимедийные средства поддержки образовательного процесса, часть занятий проводятся в виде лекций с проблемным изложением материала. На занятиях практического типа разбираются решения задач различной степени сложности, проводятся обсуждения рассматриваемых проблем в свете последних научных достижений в данной области. Студенты работают как индивидуально, так и коллективно.

Самостоятельная работа включает в себя выполнение домашних контрольных работ и теоретическую подготовку к занятиям по материалам лекций и рекомендованной литературе, приведенной в конце данной программы. Кроме того, студенты имеют возможность принимать участие в семинарах с представителями российских и зарубежных научных организаций, проводимых в Институте физики микроструктур Российской академии наук.

Формой итогового контроля знаний студентов по дисциплине является зачет с оценкой, в ходе которого оценивается уровень теоретических знаний и навыки решения практических задач.

5. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся

Самостоятельная работа студента – неотъемлемая часть подготовки высококвалифицированного специалиста в соответствующей области. Ее цель – формирование у студентов способностей и навыков к непрерывному самообразованию и профессиональному совершенствованию.

Самостоятельная работа студентов подразумевает проработку лекционного и дополнительного материала, решение домашних контрольных работ с последующей проверкой навыков решения задач.

Проработка лекционного материала осуществляется еженедельно после проведения аудиторных занятий в рамках часов, отведенных студентам на самостоятельную работу. Кроме того, работа с лекционным и дополнительным материалом (рекомендованной литературой, приведенной в конце данной программы) проводится в период сессии при подготовке к зачету по дисциплине.

Выполнение домашних работ осуществляется еженедельно или раз в две недели в соответствии с графиком изучения соответствующего лекционного материала и проведения практических занятий по соответствующей тематике.

Задачи для выполнения самостоятельных контрольных работ по каждому разделу дисциплины составляются преподавателем самостоятельно при ежегодном обновлении банка тестовых заданий. Количество вариантов зависит от числа обучающихся.

Типовые задачи, предлагаемые студентам в качестве домашних контрольных работ:

Задача 1. Получить выражение для деполяризационного сдвига линии междподзонного поглощения света квантовой ямой.

Задача 2. Найти выражение для сдвига Бурштейна-Мосса края межзонного поглощения света в квантовой яме при нулевой температуре.

Задача 3. Найти вольт-амперную характеристику сверхрешетки используя тау-приближение.

6. Фонд оценочных средств для промежуточной аттестации по дисциплине, включающий:

6.1. Перечень компетенций выпускников образовательной программы с указанием результатов обучения (знаний, умений, владений), характеризующих этапы их формирования, описание показателей и критериев оценивания компетенций на различных этапах их формирования.

ПК-3: Способен свободно владеть разделами физики, необходимыми для решения научно-инновационных задач, и применять результаты научных исследований в инновационной и проектной деятельности

Индикаторы компетенции	Критерии оценивания (дескрипторы)						
	«незачет»		«зачет»				
	«плохо»	«неудовлетворительно»	«удовлетворительно»	«хорошо»	«очень хорошо»	«отлично»	«превосходно»
<u>Умения</u> Уметь использовать новейшие достижения современной физики полупроводников в теоретической и экспериментальной научно-исследовательской работе	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 негрубым и ошибками. Выполнены все задания но не в полном объеме.	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с негрубым и 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> Владеть передовыми современными методами решения практических задач физики полупроводников	Отсутствие владения материалом. Невозможность оценить наличие навыков вследствие отказа обучающегося	При решении стандартных задач не продемонстрированы базовые навыки. Имели место грубые	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.	Продemonстрированы творческий подход к решению нестандартных задач

	гося от ответа	ошибки.	и				
Шкала оценок по проценту правильно выполненных кон- трольных заданий	0 – 20 %	20 – 50 %	50 – 70 %	70-80 %	80 – 90 %	90 – 99 %	100%

6.2. Описание шкал оценивания

Итоговый контроль качества усвоения студентами содержания дисциплины проводится в виде зачета с оценкой, на котором определяется:

- уровень усвоения студентами основного учебного материала по дисциплине;
- уровень понимания студентами изученного материала
- способности студентов использовать полученные знания для решения конкретных задач.

Зачет проводится в устной форме. Устная часть заключается в ответе студентом на теоретические вопросы курса (с предварительной подготовкой) и последующем собеседовании в рамках тематики курса. Собеседование проводится в форме вопросов, на которые студент должен дать краткий ответ. Практическая часть предусматривает решение задач по различным разделам курса.

Оценка	Уровень подготовки
Превосходно	Высокий уровень подготовки, безупречное владение теоретическим материалом. Студент дает полный и развернутый ответ на все теоретические вопросы билета; точно отвечает на дополнительные вопросы; приводит исчерпывающие, аргументированные решения всех сформулированных в билете задач. Изложение решений и полученные ответы отличаются логической последовательностью, четкостью в выражении мыслей и обоснованностью выводов, демонстрирующих знание общефизических и профессиональных дисциплин, умение уверенно применять на практике приобретенные навыки, владение в полной мере методиками решения задач. 100 %-ное выполнение контрольных экзаменационных заданий
Отлично	Высокий уровень подготовки с незначительными ошибками. Студент дает полный и развернутый ответ на все теоретические вопросы билета; точно отвечает на дополнительные вопросы; приводит почти полные, аргументированные решения всех сформулированных в билете задач с незначительными недочетами. Изложение решений и полученные ответы отличаются логической последовательностью, четкостью в выражении мыслей и обоснованностью выводов, демонстрирующих знание общефизических и профессиональных дисциплин, умение применять на практике приобретенные навыки, владение методиками решения задач. Выполнение контрольных экзаменационных заданий на 90% и выше
Очень хорошо	Хорошая подготовка. Студент дает ответ на все теоретические вопросы билета с небольшими неточностями; неполно отвечает на дополнительные вопросы; приводит достаточно аргументированные и почти полные решения всех сформулированных в билете задач с незначительными недочетами; или исчерпывающее решение приводится только для одной из двух задач билета, а вторая задача решена с заметными недочетами. Изложение решений и полученные ответы отличаются логической последовательностью, четкостью в выражении мыслей и обоснованностью выводов, демонстрирующих знание об-

	<p>специфических и профессиональных дисциплин, умение применять на практике приобретенные навыки, владение основными методиками решения задач.</p> <p>Выполнение контрольных экзаменационных заданий от 80 до 90%.</p>
Хорошо	<p>В целом хорошая подготовка с заметными ошибками или недочетами. Студент дает полный ответ на все теоретические вопросы билета с небольшими неточностями, допускает ошибки при ответах на дополнительные вопросы; приводит почти полные решения всех сформулированных в билете задач с некоторыми недочетами; или исчерпывающее решение приведено только для одной из двух задач билета, а вторая задача решена со значительными погрешностями. Изложение решений и полученные ответы отличаются логической последовательностью, достаточной четкостью в выражении мыслей и не всегда полной обоснованностью выводов, демонстрирующих, в целом, знание общефизических и профессиональных дисциплин, умение применять на практике приобретенные навыки, владение основными методиками решения задач.</p> <p>Выполнение контрольных экзаменационных заданий от 70 до 80%.</p>
Удовлетворительно	<p>Минимально достаточный уровень подготовки. Студент показывает минимальный уровень теоретических знаний, допускает ошибки при ответах на дополнительные вопросы; приводит неполные, слабо аргументированные решения всех сформулированных в билете задач. Изложение решений и полученные ответы не отличаются стройной логической последовательностью, четкостью в выражении мыслей и обоснованностью выводов, что говорит о не достаточно полном понимании общефизических и профессиональных дисциплин, умении применять на практике лишь некоторые приобретенные навыки, владении не всеми изученными методиками решения задач.</p> <p>Выполнение контрольных экзаменационных заданий от 50 до 70%.</p>
Неудовлетворительно	<p>Подготовка недостаточная и требует дополнительного изучения материала. Студент дает ошибочные ответы, как на теоретические вопросы билета, так и на наводящие и дополнительные вопросы экзаменатора; приводит решения сформулированных в билете задач с грубыми недочетами, что говорит о недостатке знаний по общефизическим и профессиональным дисциплинам, отсутствии умения применять на практике приобретенные навыки, не владение методиками решения задач.</p> <p>Выполнение контрольных экзаменационных заданий до 50%.</p>
Плохо	<p>Подготовка абсолютно недостаточная. Студент не отвечает на поставленные вопросы, демонстрирует полное непонимание сформулированных в билете задач.</p> <p>Выполнение контрольных экзаменационных заданий менее 20 %.</p>

6.3. Критерии и процедуры оценивания результатов обучения по дисциплине (модулю), характеризующих этапы формирования компетенций.

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

- индивидуальное собеседование,
- устные и/или письменные ответы на вопросы.

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

- практические контрольные задания (далее – ПКЗ), включающие одну или несколько задач.

По сложности ПКЗ разделяются на простые (стандартные) и комплексные задания. Простые ПКЗ предполагают решение в одно или два действия, применяются для оценки умений. Комплексные задания (задания повышенной сложности) требуют поэтапного решения и развернутого ответа с применением нестандартных подходов к решению. Комплексные практические задания применяются для оценки владений.

6.4. Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения, характеризующих этапы формирования компетенций и (или) для итогового контроля сформированности компетенции.

Теоретические вопросы для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины:

1. Кр- метод описания зонной структуры.
2. Описание валентной зоны с помощью кр-метода. Гамильтониан Латтинджера.
3. Основные приближения, используемые в модели Кейна. Спин-орбитальное взаимодействие в модели Кейна.
4. Правила отбора для межзонных матричных элементов оператора импульса в модели Кейна.
5. Гетеропереходы. Зонная структура полупроводников с гетеропереходами. Современные технологии роста полупроводников с гетеропереходами.
6. Квантовые ямы, сверхрешетки, квантовые провода, квантовые точки в полупроводниковых гетероструктурах.
7. Зонная структура и оптические свойства графена.
8. Спектр сверхрешетки в приближении сильной связи. Осцилляции Ванье-Штарка.
9. Метод матрицы распространения для решения задач квантовой механики.
10. Нахождение спектра электронов в квантовых ямах и сверхрешетках в модели Кейна.
11. Межзонные оптические переходы в квантовых ямах. Правила отбора.
12. Коэффициент межзонного поглощения света в квантовых ямах. Особенности экситонных эффектов в квантовых ямах.
13. Межподзонное поглощение в квантовых ямах. Правила отбора. Описание межподзонного поглощения с помощью матрицы плотности.
14. Деполяризационный сдвиг в междзонном поглощении света в квантовых ямах.
15. Межзонные полупроводниковые лазеры на квантовых ямах и квантовых точках. Лазеры с вертикальным резонатором. Микродисковые лазеры.
16. Детекторы и модуляторы света на квантовых ямах.
17. Квантово- каскадные лазеры.
18. Резонансное туннелирование. Описание резонансного туннелирования с помощью метода матриц распространения.
19. Резонансно-туннельный диод.
20. Квантовый эффект Холла.

21. Электронные состояния в сильно легированных полупроводниках. Переход металл-диэлектрик. Переходы Мотта и Андерсона. Модель структурного беспорядка.

Типовые задачи для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины:

Задача 1

Используя приближение сильной связи найти гамильтониан, описывающий движение электронов в графене, электронный спектр и оператор скорости.

Задача 2

Найти уравнения, описывающие межзонное туннелирование электронов в графене в присутствии электрического поля.

Задача 3

Найти выражение для безразмерного коэффициента поглощения света падающего нормально на квантовую яму. Используя модель Кейна, сделать численную оценку полученной величины.

Задача 4

Используя метод матрицы распространения и приближение эффективной массы найти уравнение для нахождения электронного спектра в сверхрешетке.

Задача 5

Найти интегралы движения дырок в однородном электрическом поле в изотропном приближении для гамильтониана Латтинджера.

Задача 6

Найти связь между матричными межподзонами элементами компонент оператора координаты в квантовой яме. Воспользоваться приближением эффективной массы. Поверхность постоянной энергии электрона полагать эллипсоидом вращения, с осью вращения, наклоненной к нормали к квантовой яме на заданный угол.

Задача 7

Используя метод матрицы распространения найти выражение для зависимости коэффициента туннелирования от энергии электрона в симметричной двухбарьерной структуре.

6.5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания.

Положение «О проведении текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации обучающихся в ННГУ», утверждённое приказом ректора ННГУ от 13.02.2014 г. №55-ОД,

Положение о фонде оценочных средств, утвержденное приказом ректора ННГУ от 10.06.2015 №247-ОД.

**7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины
«Дополнительные главы по физике полупроводников»**

а) основная литература:

- 1) *Питер Ю, Мануэль Кордона* Основы физики полупроводников. М.Физматлит. 2002 (имеется в электронном варианте)

- 2) Б.И.Шкловский, А.Л.Эфрос Электронные свойства легированных полупроводников. М. Наука. 1979 (имеется в электронном варианте)
- 3) Lok C. Lew Yan Voon, Morten Willatzen. The k_p-Method. Springer, 2009. (имеется в электронном варианте)
- 4) Г.Л.Бир, Г.Е.Пикус Симметрия и деформационные эффекты в полупроводниках. М. Наука, 1972. (имеется в электронном варианте)

б) дополнительная литература:

- 1) В.Я.Демиховский, Г.А.Вугальтер Физика квантовых низкоразмерных структур. М. Логос. 2000 (имеется в электронном варианте)
- 2) E.L.Ivchenko Optical spectroscopy of semiconductor Nanostructures. Springer 2007 (имеется в электронном варианте)
- 3) А.Я.Шик, Л.Г.Бакуева, С.Ф.Мусихин, С.А.Рыков. Физика Низкоразмерных систем. Санкт-Петербург, Наука, 2001. (имеется в электронном варианте)
- 4) В.Я.Алешкин курс лекций Современная физика полупроводников.
http://www.pnn.unn.ru/UserFiles/lectures/Aleshkin_lectures.pdf

в) программное обеспечение и Интернет-ресурсы

- 1) Optics express <https://www.osapublishing.org/oe/home.cfm>
- 2) http://www.pnn.unn.ru/UserFiles/lectures/Aleshkin_lectures.pdf

8. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)

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.

Программа составлена в соответствии с требованиями федерального государственного образовательного стандарта высшего образования по направлению подготовки 03.04.02 Физика.

Автор(ы):

профессор

Алешкин В.Я.

Рецензент(ы):

Зав. кафедрой

Программа одобрена на заседании Учебно-методической комиссии физического факультета ННГУ от «____» _____ 202_ года, протокол № б/н.

Председатель

Учебно-методической комиссии
физического факультета ННГУ

_____ / Перов А.А. /