

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования_
«Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет
им. Н.И. Лобачевского»**

Высшая школа общей и прикладной физики

УТВЕРЖДЕНО

решением Ученого совета ННГУ

протокол № 10 от 02.12.2024 г.

Рабочая программа дисциплины

Дополнительные главы по физике полупроводников

Уровень высшего образования

Магистратура

Направление подготовки / специальность

03.04.02 - Физика

Направленность образовательной программы

Общая и прикладная физика

Форма обучения

очная

г. Нижний Новгород

2025 год начала подготовки

1. Место дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина Б1.В.ДВ.02.02.02 Дополнительные главы по физике полупроводников 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-3: Способен свободно владеть разделами физики, необходимыми для решения научно-инновационных задач, и применять результаты научных исследований в инновационной и проектной деятельности	ПК-3.1: Демонстрация способности свободно владеть разделами физики, необходимыми для решения научно-инновационных задач, и применять результаты научных исследований в инновационной и проектной деятельности	ПК-3.1: Знать основные свойства низкоразмерных полупроводниковых систем и основные модели для их описания; Уметь использовать новейшие достижения в современной физике полупроводников в теоретической и экспериментальной научно-исследовательской работе; Владеть практическими методами решения задач физики полупроводников	Задачи Тест	Экзамен: Задачи Контрольные вопросы

3. Структура и содержание дисциплины

3.1 Трудоемкость дисциплины

	очная
Общая трудоемкость, з.е.	3
Часов по учебному плану	108
в том числе	
аудиторные занятия (контактная работа):	
- занятия лекционного типа	16
- занятия семинарского типа (практические занятия / лабораторные работы)	16
- КСР	2
самостоятельная работа	38
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 взаимодействии с преподавателем), часы из них			Самостоятельная работа обучающегося, часы
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа (практические занятия/лабора- торные работы), часы	Всего	
	о ф о	о ф о	о ф о	о ф о	о ф о
Тема 1 Модель Кейна и её использование для описания зонного спектра полупроводников	10	2	2	4	6
Тема 2 Гетеропереходы. Квантовые ямы, квантовые провода, квантовые точки. Графен.	10	2	2	4	6
Тема 3. Оптические свойства низкоразмерных полупроводниковых систем.	10	2	2	4	6
Тема 4. Полупроводниковые лазеры. Квантово-каскадные лазеры. Полупроводниковые модуляторы и детекторы на квантовых ямах	14	4	4	8	6
Тема 5. Основные свойства сверхрешеток. Резонансное туннелирование. Резонансно туннельный диод.	10	2	2	4	6
Тема 6. Квантовый эффект Холла. Основные представления об электронном спектре сильно легированных полупроводников	16	4	4	8	8
Аттестация	36				
КСР	2			2	
Итого	108	16	16	34	38

Содержание разделов и тем дисциплины

Тема 1 Модель Кейна и её использование для описания зонного спектра полупроводников

Тема 2 Гетеропереходы. Квантовые ямы, квантовые провода, квантовые точки. Графен.

Тема 3. Оптические свойства низкоразмерных полупроводниковых систем.

Тема 4. Полупроводниковые лазеры. Квантово-каскадные лазеры. Полупроводниковые модуляторы и детекторы на квантовых ямах

Тема 5. Основные свойства сверхрешеток. Резонансное туннелирование. Резонансно туннельный диод.

Тема 6. Квантовый эффект Холла. Основные представления об электронном спектре сильно легированных полупроводников

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) 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 -Metod. 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 (в соответствии с содержанием дисциплины)

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

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 - Тест) для оценки сформированности компетенции ПК-3:

1. Какова зависимость плотности состояний от энергии электрона ϵ в первой подзоне размерного квантования квантовой ямы, если закон дисперсии электрона в объемном материале квадратичен:

а) $\sim \epsilon^{1/2}$, б) $\sim \epsilon^{-1/2}$, в) $\sim \epsilon^0$

Ответ:

2. Какое утверждение справедливо:

а) энергия связи экситона в квантовой яме больше, чем в объемном материале,

б) энергия связи экситона в квантовой яме меньше, чем в объемном материале,

в) энергия связи экситона в квантовой яме такая же, как в объемном материале,

Полагать что массы электронов и дырок в квантовой яме такие же как и в объемном материале.

Ответ:

3. В симметричной квантовой яме разрешены межзонные переходы (волновой вектор электрона полагается равным нулю)

а) с изменением четности номера уровня размерного квантования

б) с сохранением четности номера уровня размерного квантования

в) разрешены любые переходы

Ответ:

4. Какой параметр полагается малым в кр-методе:

а) энергия электрона, б) отклонение импульса от точки экстремума, в) эффективная масса электрона

Ответ:

5. Можно ли использовать модель Кейна для описания зонной структуры непрямозонных полупроводников (как зоны проводимости, так и валентной)?

а) можно, б) нельзя

Овет:

6. Как получить из гамильтониана Кейна, гамильтониан, описывающий воздействие деформации на спектр электрона:

а) заменить волновой вектор на вектор смещения и ввести новые постоянные в гамильтониане.

б) заменить произведение компонент волновых векторов на тензор деформации, занулить линейные по волновому вектору слагаемые и ввести новые постоянные,

в) из гамильтониана Кейна невозможно получить вид гамильтониана деформации,

Ответ:

7. В чем причина появления пиков резонансного туннелирования в структуре с двумя барьерами?

а) в интерференции электронных волн, отраженных от разных границ

б) в дифракции электронных волн, отраженных от разных границ

в) в рассеянии электронов при туннелировании

Ответ:

8. Зависимость коэффициента туннелирования вблизи резонанса от энергии электрона задается функцией:

а) Лежандра, б) Лоренца, в) экспонентой

Ответ:

9. Амплитуда волновой функции в области между двумя барьерами (для двухбарьерной структуры) при резонансной энергии как функция от энергии электрона при заданной амплитуде волны налетающего на структуру электрона имеет:

а) минимум, б) максимум, в) ноль второй производной

Ответ:

10. Чему равен коэффициент туннелирования через симметричную двух барьерную структуру при резонансной энергии:

а) 0.5, б) 0.25, в) 1, г) 1/р, д) определяется прозрачностью барьеров

Ответ:

11. Какова причина уменьшения термодинамической энергии ионизации примеси при увеличении её концентрации:

а) кулоновское взаимодействие, б) экранирование электронами поля примеси, в) перекрытие волновых функций электронов на соседних примесях

Ответ:

12. Условие перехода металл-изолятор по Мотту (моттовского перехода металл-изолятор)

а) перекрытие верхней (которая возникла из-за кулоновского отталкивания электронов) и нижней примесных зон, б) обращение в ноль энергии ионизации, в) регулярное расположение примеси

Ответ:

Критерии оценивания (оценочное средство - Тест)

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

Оценка	Критерии оценивания
	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.

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 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
	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-3

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 междподзонном 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.

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.

Оценка	Критерии оценивания
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. Ю Питер. Основы физики полупроводников = Fundamentals of Semiconductors / пер. с англ. И. И. Решиной ; под ред. Б. П. Захарчени. - М. : Физматлит, 2002. - 560 с. - ISBN 5-9221-0268-0 : 56.00., 3 экз.
2. Шкловский Борис Ионович. Электронные свойства легированных полупроводников. - М. : Наука, 1979. - 416 с. : ил. - (Физика полупроводников и полупроводниковых приборов). - 2.40., 2 экз.
3. Бир Геннадий Левикович. Симметрия и деформационные эффекты в полупроводниках. - М. : Наука, 1972. - 584 с. : с черт. - 2.66., 3 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. 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.

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

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

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.

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки/специальности 03.04.02 - Физика.

Автор(ы): Алешкин Владимир Яковлевич, доктор физико-математических наук, профессор.

Заведующий кафедрой: Викторов Михаил Евгеньевич, кандидат физико-математических наук.

Программа одобрена на заседании методической комиссии от 31.01.2025, протокол № 2.