

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

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

---

Радиофизический факультет  
(факультет / институт / филиал)

УТВЕРЖДЕНО  
решением  
ученого совета ННГУ  
протокол № 13 от 30.11.2022 г

**Рабочая программа дисциплины**

---

Дополнительные главы по физике полупроводников  
(наименование дисциплины (модуля))

Уровень высшего образования  
магистратура  
(бакалавриат / магистратура / специалитет)

Направление подготовки / специальность  
03.04.03 радиофизика  
(указывается код и наименование направления подготовки / специальности)

---

Направленность образовательной программы  
Квантовая радиофизика и лазерная физика  
(указывается профиль / магистерская программа / специализация)

---

Форма обучения  
очная  
(очная / очно-заочная / заочная)

Нижегород

2023 год

## 1. Место дисциплины в структуре ООП

№ варианта	Место дисциплины в учебном плане образовательной программы	Стандартный текст для автоматического заполнения в конструкторе РПД
2	Блок 1. Дисциплины (модули) Часть, формируемая участниками образовательных отношений	Дисциплина Б1.В.ДВ.06.03, дополнительные главы по физике полупроводников относятся к части ООП направления подготовки 03.04.03 <i>радиофизика</i> , формируемой участниками образовательных отношений.

## 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**	
ПК-1. Способен анализировать и обрабатывать научную информацию и результаты исследований в области квантовой радиофизики, лазерной физики и фотоники при решении задач своей профессиональной деятельности	ПК-1.1. Применяет принципы сбора и анализа информации, рассматривает и оценивает современные научные достижения, а также генерирует новые идеи при решении исследовательских и практических задач ПК-1.2. Работает с большим объемом данных, систематизирует и анализирует информацию, полученную из различных источников, в том числе с использованием современных информационных и коммуникационных технологий	Знать фундаментальные разделы физики и радиофизики, необходимые для решения научно-исследовательских задач в области физики полупроводников Уметь использовать знание фундаментальных разделов физики и радиофизики при решении научно-исследовательских задач в области физики полупроводников Владеть опытом использования знаний по фундаментальным разделам физики и радиофизики для решения научно-исследовательских задач в области физики полупроводников	<i>Собеседование, задача</i>
ПК-2. Способен выполнять теоретические и	ПК-2.1. Анализирует современное состояние	Знать основные свойства низкоразмерных полупроводниковых систем и основные модели для их	<i>Собеседование, задача</i>

экспериментальные исследования и разработки по отдельным разделам тем научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в области квантовой радиофизики, лазерной физики и фотоники и оформлять их результаты	исследований в области квантовой радиофизики, лазерной физики и фотоники, современные подходы к описанию и моделированию различных физических явлений и оценке полученных результатов ПК-2.2. Выбирает и применяет аналитические, аналитико-численные, экспериментальные методы исследования в соответствии с типом поставленной задачи ПК-2.3. Участвует в планировании, подготовке и проведении НИР ПК-2.4. Анализирует полученные данные, формулирует выводы и рекомендации по отдельным разделам тем в области квантовой радиофизики, лазерной физики и фотоники	описания; Уметь использовать новейшие достижения в современной физике полупроводников в теоретической и экспериментальной научно-исследовательской работе; Владеть практическими методами решения задач физики полупроводников;	
---	---	---	--

### 3. Структура и содержание дисциплины

#### 3.1 Трудоемкость дисциплины

	<b>очная форма обучения</b>
<b>Общая трудоемкость</b>	<b>2 ЗЕТ</b>
<b>Часов по учебному плану</b>	<b>72</b>
<b>в том числе</b>	
<b>аудиторные занятия (контактная работа):</b>	
<b>- занятия лекционного типа</b>	<b>32</b>

- занятия семинарского типа ( практические занятия / лабораторные работы)	
самостоятельная работа	39
КСР	1
Промежуточная аттестация – зачет	

### 3.2. Содержание дисциплины

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины,  форма промежуточной аттестации по дисциплине	Всего (часы)	В том числе				Самостоятельная работа обучающегося, часы
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы из них				
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Занятия лабораторного типа	Всего	
Тема 1 Модель Кейна и её использование для описания зонного спектра полупроводников	10	4				6
Тема 2 Гетеропереходы. Квантовые ямы, квантовые провода, квантовые точки. Графен.	10	4				6
Тема 3. Оптические свойства низкоразмерных полупроводниковых систем.	11	4				7
Тема 4. Полупроводниковые лазеры. Квантово-каскадные лазеры. Полупроводниковые модуляторы и детекторы на квантовых ямах	15	5				7
Тема 5. Основные свойства сверхрешеток. Резонансное туннелирование. Резонансно туннельный диод.	11	3				7
Тема 6. Квантовый эффект Холла. Основные представления об электронном спектре сильно легированных полупроводников	14	8				6
в т.ч.текущий контроль		1				
Промежуточная аттестация – зачет						

Практические занятия /лабораторные работы организуются, в том числе, в форме практической подготовки, которая предусматривает участие обучающихся в выполнении отдельных элементов работ, связанных с будущей профессиональной деятельностью. На проведение практических занятий / лабораторных работ в форме практической подготовки отводится: очная форма обучения - 4 ч.

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

Контрольные вопросы и задания для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины приведены в п. 5.2.

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.

#### 5. Фонд оценочных средств для промежуточной аттестации по дисциплине (модулю),

включающий:

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

Уровень сформированности компетенций (индикатора достижения компетенций)	Шкала оценивания сформированности компетенций						
	плохо	неудовлетворительно	удовлетворительно	хорошо	очень хорошо	отлично	превосходно
	не зачтено		зачтено				
<u>Знания</u>	Отсутствие знаний теоретического материала.	Уровень знаний ниже минимальных требований.	Минимально допустимый уровень знаний. Допущено	Уровень знаний в объеме, соответствующем	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе	Уровень знаний в объеме, соответствующем	Уровень знаний в объеме, превышающем программу

	Невозможность оценить полноту знаний вследствие отказа обучающегося от ответа	Имели место грубые ошибки.	много негрубых ошибки.	программе подготовки. Допущено несколько негрубых ошибок	подготовки. Допущено несколько несущественных ошибок	программе подготовки, без ошибок.	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 несущественным 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 владения материалом. 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 оценки при промежуточной аттестации

Оценка		Уровень подготовки
	<b>превосходно</b>	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
<b>зачтено</b>	<b>отлично</b>	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «отлично», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «отлично»
	<b>очень хорошо</b>	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «очень хорошо», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «очень хорошо»
	<b>хорошо</b>	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже

		«хорошо», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «хорошо»
	<b>удовлетворительно</b>	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»
<b>не зачтено</b>	<b>неудовлетворительно</b>	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «неудовлетворительно», ни одна из компетенций не сформирована на уровне «плохо»
	<b>плохо</b>	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «плохо»

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

### 5.2.1 Контрольные вопросы

Вопрос	Код компетенции
1. Описание валентной зоны с помощью кр-метода. Гамильтониан Латтинджера	ПК-1
2. Модель Кейна.	ПК-1
3. Правила отбора для межзонных матричных элементов оператора импульса в модели Кейна.	ПК-2
4. Гетеропереходы. Зонная структура полупроводников с гетеропереходами. Современные технологии роста полупроводников с гетеропереходами	ПК-2
5. Квантовые ямы, сверхрешетки, квантовые провода, квантовые точки в полупроводниковых гетероструктурах.	ПК-2
6. Зонная структура и оптические свойства графена.	ПК-1
7. Спектр сверхрешетки в приближении сильной связи. Осцилляции Ванье-Штарка	ПК-1
8. Метод матрицы распространения для решения задач квантовой механики.	ПК-2
9. Нахождение спектра электронов в квантовых ямах и сверхрешетках в модели Кейна.	ПК-2
10. Межзонные оптические переходы в квантовых ямах. Правила отбора.	ПК-1
11. Коэффициент межзонного поглощения света в квантовых ямах. Особенности экситонных эффектов в квантовых ямах.	ПК-1
12. Межподзонное поглощение в квантовых ямах. Правила отбора. Описание межподзонного поглощения с помощью матрицы плотности.	ПК-1
13. Деполяризационный сдвиг в междподзонном поглощении света в квантовых ямах.	ПК-1
14. Межзонные полупроводниковые лазеры на квантовых ямах и квантовых точках. Лазеры с вертикальным резонатором. Микродисковые лазеры.	ПК-2
15. Детекторы и модуляторы света на квантовых ямах.	ПК-1

16. Квантово- каскадные лазеры.	ПК-1
17. Резонансное туннелирование. Описание резонансного туннелирования с помощью метода матриц распространения.	ПК-2
18. Резонансно-туннельный диод.	ПК-1
19. Квантовый эффект Холла.	ПК-1
20. Электронные состояния в сильно легированных полупроводниках. Переход металл-диэлектрик. Переходы Мотта и Андерсона. Модель структурного беспорядка.	ПК-1

### **5.2.2. Типовые задачи для проведения текущего контроля:**

#### 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.

### **5.2.3. Типовые задачи для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины:**

Задача 1. Найти вид оператора скорости в графене в окрестности К точки. Воспользоваться явным видом гамильтониана вблизи этой точки.

Задача 2. Найти правила отбора для межподзонных переходов в квантовой яме, помещенной в магнитное поле, направленной по её нормали.

Задача 3. Найти кинетические энергии электрона и дырки, рожденных при поглощении фотона с энергией 1.5 эВ в квантовой яме с шириной запрещенной зоны 1.45 эВ. Эффективные массы электронов и дырок считать равными 0.07 и 0.4 массы свободного электрона, соответственно.

Задача 4. Найти зависимость деполяризационного сдвига линии межподзонного поглощения света в квантовой яме от разности концентраций электронов на основной и возбужденной подзонах.



## **6. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины**

### **а) основная литература:**

- 1) Г.Л.Бир, Г.Е.Пикус Симметрия и деформационные эффекты в полупроводниках. М. Наука, 1972. – 3экз.

### **б) дополнительная литература:**

- 1) В.Я.Демиховский, Г.А.Вугальтер Физика квантовых низкоразмерных структур. М. Логос. 2000. – 3экз.
- 2) А.Я.Шик, Л.Г.Бакуева, С.Ф.Мусихин, С.А.Рыков. Физика Низкоразмерных систем. Санкт-Петербург, Наука, 2001. – 5 экз.
- 4) В.Я.Алешкин курс лекций Современная физика полупроводников.  
[http://www.pnn.unn.ru/UserFiles/lectures/Aleshkin\\_lectures.pdf](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](http://www.pnn.unn.ru/UserFiles/lectures/Aleshkin_lectures.pdf)

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

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 ФГОС ВО – магистратура по направлению подготовки 03.04.03 Радиофизика, утвержденного приказом Министерства науки и высшего образования РФ от 7 августа 2020 г. N 918.

Автор (ы) д.ф.-м.н. профессор В.Я. Алешкин

Заведующий кафедрой д.ф.-м.н. профессор М.И. Бакунов

Программа одобрена на заседании методической комиссии радиофизического факультета «14» ноября 2022 года, протокол № 08/22.