

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное учреждение  
высшего профессионального образования  
"Казанский (Приволжский) федеральный университет"  
Институт физики



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по образовательной деятельности КФУ

Проф. Таюрский Д.А.

  
КАЗАНСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ДЕПАРТАМЕНТ  
ОБРАЗОВАНИЯ  
(ДО КФУ)

\_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

*подписано электронно-цифровой подписью*

### Программа дисциплины

Квантовые размерные эффекты в гетероструктурах БЗ.ДВ.9

Направление подготовки: 011200.62 - Физика

Профиль подготовки: не предусмотрено

Квалификация выпускника: бакалавр

Форма обучения: очное

Язык обучения: русский

**Автор(ы):**

Парфенов В.В.

**Рецензент(ы):**

Деминов Р.Г.

**СОГЛАСОВАНО:**

Заведующий(ая) кафедрой: Тагиров Л. Р.

Протокол заседания кафедры No \_\_\_\_\_ от "\_\_\_\_\_" \_\_\_\_\_ 201\_\_ г

Учебно-методическая комиссия Института физики:

Протокол заседания УМК No \_\_\_\_\_ от "\_\_\_\_\_" \_\_\_\_\_ 201\_\_ г

Регистрационный No 6121417

Казань

2017

## Содержание

1. Цели освоения дисциплины
2. Место дисциплины в структуре основной образовательной программы
3. Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины /модуля
4. Структура и содержание дисциплины/ модуля
5. Образовательные технологии, включая интерактивные формы обучения
6. Оценочные средства для текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины и учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов
7. Литература
8. Интернет-ресурсы
9. Материально-техническое обеспечение дисциплины/модуля согласно утвержденному учебному плану

Программу дисциплины разработал(а)(и) профессор, д.н. (доцент) Парфенов В.В. Кафедра физики твердого тела Отделение физики, Viktor.Parfenov@kpfu.ru

### 1. Цели освоения дисциплины

ознакомление студентов с физическими основами нанoeлектроники и нанотехнологий.

### 2. Место дисциплины в структуре основной образовательной программы высшего профессионального образования

Данная учебная дисциплина включена в раздел " Б3.ДВ.9 Профессиональный" основной образовательной программы 011200.62 Физика и относится к дисциплинам по выбору. Осваивается на 4 курсе, 8 семестр.

является дисциплиной по выбору модуля "Общая физика" профессионального цикла (блок Б.3ДВ9) дисциплин подготовки студентов по направлению подготовки 011200 "Физика".

### 3. Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины /модуля

В результате освоения дисциплины формируются следующие компетенции:

Шифр компетенции	Расшифровка приобретаемой компетенции
ОПК-3 (профессиональные компетенции)	способностью использовать базовые теоретические знания фундаментальных разделов общей и теоретической физики для решения профессиональных задач
ПК-1 (профессиональные компетенции)	способностью использовать специализированные знания в области физики для освоения профильных физических дисциплин
ПК-3 (профессиональные компетенции)	готовностью применять на практике профессиональные знания теории и методов физических исследований
ПК-4 (профессиональные компетенции)	способностью применять на практике профессиональные знания и умения, полученные при освоении профильных физических дисциплин
ПК-5 (профессиональные компетенции)	способностью пользоваться современными методами обработки, анализа и синтеза физической информации в избранной области физических исследований

В результате освоения дисциплины студент:

1. должен знать:

- о физических процессах, происходящих в структурах, имеющих размеры 10-100 нм;
- о технологических особенностях синтеза новых полупроводниковых материалов и построения на их основе наноразмерных структур для электроники
- физические основы нанoeлектроники - условия возникновения размерного квантования электронного газа в полупроводниковых структурах, специфические эффекты, возникающими вследствие такого квантования;
- механизмы переноса носителей заряда в низкоразмерных системах и полупроводниковых приборах на основе таких систем;
- фотоэлектрические, оптические и люминесцентные явления в гетероструктурах;
- применение наноразмерных структур в электронной технике

2. должен уметь:

измерять на современном оборудовании физические параметры полупроводниковых приборов на основе гетероструктур

3. должен владеть:

Измерять на современном оборудовании физические параметры полупроводниковых приборов на основе гетероструктур.

- выполнять системный научный анализ профессиональных проблем различного уровня сложности. Уметь рассчитывать и моделировать основные параметры наноструктурных материалов, изделий и устройств на их основе, исходя из требуемых характеристик и условий эксплуатации. Применять знания о фундаментальных основах технологических процессов получения материалов и компонентов нано- и микросистемной техники. Уметь применять материалы и компоненты нано- и микросистемной техники при создании технических систем различного функционального назначения.

4. должен демонстрировать способность и готовность:

- системного научного анализа проблем (как природных, так и профессиональных) различного уровня сложности

#### 4. Структура и содержание дисциплины/ модуля

Общая трудоемкость дисциплины составляет 3 зачетных(ые) единиц(ы) 108 часа(ов).

Форма промежуточного контроля дисциплины зачет в 8 семестре.

Суммарно по дисциплине можно получить 100 баллов, из них текущая работа оценивается в 50 баллов, итоговая форма контроля - в 50 баллов. Минимальное количество для допуска к зачету 28 баллов.

86 баллов и более - "отлично" (отл.);

71-85 баллов - "хорошо" (хор.);

55-70 баллов - "удовлетворительно" (удов.);

54 балла и менее - "неудовлетворительно" (неуд.).

#### 4.1 Структура и содержание аудиторной работы по дисциплине/ модулю

##### Тематический план дисциплины/модуля

N	Раздел Дисциплины/ Модуля	Семестр	Неделя семестра	Виды и часы аудиторной работы, их трудоемкость (в часах)			Текущие формы контроля
				Лекции	Практические занятия	Лабораторные работы	
1.	Тема 1. Физические свойства основных материалов для формирования гетероструктур. Размерное квантование электронного газа. Транспортные явления в низкоразмерных системах.	8	1-4	8	8	0	Устный опрос

N	Раздел Дисциплины/ Модуля	Семестр	Неделя семестра	Виды и часы аудиторной работы, их трудоемкость (в часах)			Текущие формы контроля
				Лекции	Практические занятия	Лабораторные работы	
2.	Тема 2. Проблема достижения высокой подвижности носителей. Баллистический транспорт в наноструктурах.	8	5-8	8	8	0	Контрольная работа Устный опрос
3.	Тема 3. Целочисленный квантовый эффект Холла. Дробный квантовый эффект Холла. Перенос электронов в двухбарьерной квантовой структуре (ДБКС).	8	9-12	8	8	0	Устный опрос
4.	Тема 4. Транзисторные наноструктуры. Наноразмерные структур в оптоэлектронных приборах. Одноэлектроника.	8	13-15	6	6	0	Контрольная работа Устный опрос
	Тема . Итоговая форма контроля	8		0	0	0	Зачет
	Итого			30	30	0	

#### 4.2 Содержание дисциплины

**Тема 1. Физические свойства основных материалов для формирования гетероструктур. Размерное квантование электронного газа. Транспортные явления в низкоразмерных системах.**

**лекционное занятие (8 часа(ов)):**

Физические свойства основных материалов для формирования гетероструктур полупроводниковых соединений A<sub>3</sub>B<sub>5</sub>, A<sub>2</sub>B<sub>6</sub>, A<sub>4</sub>B<sub>6</sub>. Некоторые вопросы технологии получения совершенных гетероструктур. Условия наблюдения квантовых размерных эффектов. Квантовые плоскости, квантовые нити, квантовые точки. Транспортные явления в низкоразмерных системах (ОПК-3, ПК-1, ПК-4).

**практическое занятие (8 часа(ов)):**

Физические явления при контакте двух полупроводников с разной шириной запрещенной зоны. Гетероструктуры 1 и 2 типов. Размерное квантование электронного газа (ПК-3, ПК-5).

**Тема 2. Проблема достижения высокой подвижности носителей. Баллистический транспорт в наноструктурах.**

**лекционное занятие (8 часа(ов)):**

Транспортные явления в низкоразмерных системах. Проблема достижения высокой подвижности носителей. Рассеяние электронов на ионизированных примесях. Физические основы и технологические приемы, уменьшающие это рассеяние. Спейсеры и дельта-легирование (ОПК-3, ПК-1, ПК-4).

**практическое занятие (8 часа(ов)):**

Размерное квантование фононного спектра в сверхрешетках. Рассеяние электронов на оптических фононах в сверхрешетках. Баллистический транспорт в наноструктурах. Пространственный, временной и комбинированный overshoot. Условия реализации и наблюдения (ПК-3, ПК-5).

**Тема 3. Целочисленный квантовый эффект Холла. Дробный квантовый эффект Холла. Перенос электронов в двухбарьерной квантовой структуре (ДБКС).**

**лекционное занятие (8 часа(ов)):**

Электронный газ в квантующем магнитном поле. Уровни Ландау. Условия квантования. Низкоразмерный электронный газ в квантующем магнитном поле. Целочисленный квантовый эффект Холла. Дробный квантовый эффект Холла. Коллективные электронные возбуждения - квазичастицы с дробным зарядом и  $\theta$ -статистикой. Модель Лафлина (ОПК-3, ПК-1, ПК-4).

**практическое занятие (8 часа(ов)):**

Перенос электронов в двухбарьерной квантовой структуре (ДБКС). Пути управления коэффициентом прозрачности ДБКС (ПК-3, ПК-5).

**Тема 4. Транзисторные наноструктуры. Наноразмерные структур в оптоэлектронных приборах. Одноэлектроника.**

**лекционное занятие (6 часа(ов)):**

Транзисторные наноструктуры: полевые транзисторы с высокой подвижностью электронов (HEMT), транзисторы с резонансным туннелированием через квантовую точку (RHET) и др. (ОПК-3, ПК-1, ПК-4).

**практическое занятие (6 часа(ов)):**

Применение наноразмерных структур в оптоэлектронных приборах. Инжекционные лазеры на гетероструктурах. Лазеры на квантовых точках. Лавинные фотодиоды на сверхрешетках. Одноэлектроника. Условия наблюдения одноэлектронного туннелирования. Графен - двумерный кристалл. Зонная структура. Электроны с ?нулевой? массой и высокой подвижностью. Перспективы применения в электронике (ПК-3, ПК-5).

**4.3 Структура и содержание самостоятельной работы дисциплины (модуля)**

N	Раздел Дисциплины	Семестр	Неделя семестра	Виды самостоятельной работы студентов	Трудоемкость (в часах)	Формы контроля самостоятельной работы
1.	Тема 1. Физические свойства основных материалов для формирования гетероструктур. Размерное квантование электронного газа. Транспортные явления в низкоразмерных системах.	8	1-4	подготовка к устному опросу	12	устный опрос
2.	Тема 2. Проблема достижения высокой подвижности носителей. Баллистический транспорт в наноструктурах.	8	5-8	подготовка к контрольной работе	4	контрольная работа
				подготовка к устному опросу	8	устный опрос

N	Раздел Дисциплины	Семестр	Неделя семестра	Виды самостоятельной работы студентов	Трудоемкость (в часах)	Формы контроля самостоятельной работы
3.	Тема 3. Целочисленный квантовый эффект Холла. Дробный квантовый эффект Холла. Перенос электронов в двухбарьерной квантовой структуре (ДБКС).	8	9-12	подготовка к устному опросу	14	устный опрос
4.	Тема 4. Транзисторные наноструктуры. Наноразмерные структур в оптоэлектронных приборах. Одноэлектроника.	8	13-15	подготовка к контрольной работе	4	контрольная работа
				подготовка к устному опросу	6	устный опрос
	Итого				48	

### 5. Образовательные технологии, включая интерактивные формы обучения

лекции, лабораторные и практические занятия, Интерактивные методы работы постоянное взаимодействие между преподавателем и студентом в процессе обучения, самостоятельная работа студента (выполнение индивидуальных домашних заданий), консультации

### 6. Оценочные средства для текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины и учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов

#### Тема 1. Физические свойства основных материалов для формирования гетероструктур. Размерное квантование электронного газа. Транспортные явления в низкоразмерных системах.

устный опрос , примерные вопросы:

"Особенности зонной структуры полупроводников A3B5, A2B6, A4B6"(ПК-1,ПК-4) "Синтез гетероструктур методом МОГФЭ" (ПК-3,ПК-5), "Гетероструктуры 1 и 2 типов"(ПК-1,ПК-4), "Особенности размерного квантования электронного газа в металлах и полупроводниках" (ОПК-3)

#### Тема 2. Проблема достижения высокой подвижности носителей. Баллистический транспорт в наноструктурах.

контрольная работа , примерные вопросы:

1. Как зависит ширина запрещенной зоны от среднего атомного номера в соединениях A3B5? 2. Применение правила Музера-Пирсона для описания бинарных полупроводников. 3. Спектр энергий электрона в квантовых плоскостях, нитях, точках

устный опрос , примерные вопросы:

"Применение спейсеров и дельта-легирования для обеспечения высокой подвижности электронов в ГС" (ПК-1,ПК-4) "Пространственный, временной и комбинированный overshoot" (ПК-1,ПК-4)

#### Тема 3. Целочисленный квантовый эффект Холла. Дробный квантовый эффект Холла. Перенос электронов в двухбарьерной квантовой структуре (ДБКС).

устный опрос , примерные вопросы:



"Экспериментальное наблюдение целочисленного КЭХ" (ПК-3, ПК-5) "Экспериментальное наблюдение дробного КЭХ" (ПК-3, ПК-5) "Экспериментальное исследование вольт-амперной характеристики ДБКС" (ПК-3, ПК-5)

#### **Тема 4. Транзисторные наноструктуры. Наноразмерные структур в оптоэлектронных приборах. Одноэлектроника.**

контрольная работа , примерные вопросы:

1. Междолинное рассеяние и эффект "убегания" в арсениде галлия и твердых растворах на его основе. 2. Условия наблюдения пространственного, временного и комбинированного режима "overshoot". 3. HEMT и RHET -транзисторы. Устройство и принцип действия.

устный опрос , примерные вопросы:

"Логические элементы на основе одноэлектронных структур" (ПК-1, ПК-4) "Графен и другие двумерные кристаллы. Перспективы применения в электронике" (ОПК-3).

#### **Тема . Итоговая форма контроля**

Примерные вопросы к зачету:

##### **ВОПРОСЫ К ЗАЧЁТУ**

1. Физические свойства полупроводниковых соединений  $A_3B_5$ ,  $A_2B_6$ ,  $A_4B_6$ .
2. Физические явления при контакте двух полупроводников с разной шириной запрещенной зоны.
3. Размерное квантование электронного газа. Условия наблюдения квантовых размерных эффектов.
4. Решение уравнения Шредингера для электрона в прямоугольной потенциальной яме. Особенности образования треугольной потенциальной ямы в МОП-структурах и гетероструктурах.
5. Туннелирование электрона через потенциальные барьеры различной формы.
6. Транспортные явления в низкоразмерных системах. Междолинный переброс в арсениде галлия и твердых растворах на его основе.
7. Рассеяние электронов на ионизированных примесях. Технологические приемы, уменьшающие это рассеяние.
8. Размерное квантование фононного спектра в сверхрешетках. Рассеяние электронов на оптических фононах в сверхрешетках.
9. Баллистический транспорт в наноструктурах. Временной и пространственный overshoot. Условия реализации и наблюдения.
10. Низкоразмерный электронный газ в квантующем магнитном поле. Целочисленный квантовый эффект Холла.
11. Дробный квантовый эффект Холла. Коллективные электронные возбуждения - квазичастицы с дробным зарядом и  $\theta$ -статистикой.
12. Перенос электронов в двухбарьерной квантовой структуре (ДБКС). Коэффициент прозрачности ДБКС.
13. Транзисторные наноструктуры Устройство и принцип действия. Рабочий диапазон частот.
14. Применение наноразмерных структур в оптоэлектронных приборах.

#### **7.1. Основная литература:**

1. Игнатов, А. Н. Классическая электроника и наноэлектроника [Электронный ресурс] : учеб. пособие / А. Н. Игнатов, Н. Е. Фадеева, В. Л. Савиных, В. Я. Вайспапир, С. В. Воробьева. ? 2-е изд., стер. . М. : ФЛИНТА, 2012. ? 728 с. - ISBN 978-5-9765-0263-5

<http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=455216>



2. Шука, А. А. Нанoeлектроника [Электронный ресурс] : учебное пособие / А. А. Шука ; под ред. А. С. Сигова. - Эл. изд. - М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. - 342 с. : ил.: 60x90/16. - (Нанотехнологии). - ISBN 978-5-9963-1055-5.

<http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=366748>

3. Гантмахер, В. Ф. Электроны в неупорядоченных средах [Электронный ресурс] / В. Ф. Гантмахер. - 2-е изд., испр. и доп. - М. : ФИЗМАТЛИТ, 2005. - 232 с. - ISBN 978-5-9221-0578-1.

<http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=416511>

## 7.2. Дополнительная литература:

Варизонные полупроводники и гетероструктуры : учебное пособие для студентов / В. И. Ильин, С. Ф. Мусихин, А. Я. Шик ; Под общ. ред. В. И. Ильина, А. Я. Шика .? Санкт-Петербург : Наука, 2000 .? 100 с. : ил. ? (Новые разделы физики полупроводников) .? В надзаг.: Федеральная целевая программа "Государственная поддержка интеграции высшего образования и фундаментальной науки на 1997- 2000 годы" .? Библиогр.: с.97-98 .? ISBN 5-02-024935-1 : 22.00.

2. Теоретическая физика : учеб. пособие для студентов физ. специальностей ун-тов : в 10 т. / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц ; под ред. Л. П. Питаевского .? М. : ФИЗМАТЛИТ, 2003-. Т. 3: Квантовая механика (нерелятивистская теория) .? 5-е изд., стер. ? 2004 .? 800 с. : ил.

## 7.3. Интернет-ресурсы:

гетероструктура - [http://femto.com.ua/articles/part\\_1/0743.html](http://femto.com.ua/articles/part_1/0743.html)

гетероструктуры на основе AlN, GaN - [http://www.kit-e.ru/articles/svch/2008\\_2\\_138.php](http://www.kit-e.ru/articles/svch/2008_2_138.php)

графен и его применения - <http://ru.wikipedia.org/wiki/%C3%F0%E0%F4%E5%ED>

квантовый эффект холла -

[http://dic.academic.ru/dic.nsf/enc\\_physics/3462/%D0%9A%D0%92%D0%90%D0%9D%D0%A2%D0%9E](http://dic.academic.ru/dic.nsf/enc_physics/3462/%D0%9A%D0%92%D0%90%D0%9D%D0%A2%D0%9E)

лазер на квантовых точках - <http://www.nanometer.ru/2009/03/22/12377431214279.html>

## 8. Материально-техническое обеспечение дисциплины(модуля)

Освоение дисциплины "Квантовые размерные эффекты в гетероструктурах" предполагает использование следующего материально-технического обеспечения:

Мультимедийная аудитория, вместимостью более 60 человек. Мультимедийная аудитория состоит из интегрированных инженерных систем с единой системой управления, оснащенная современными средствами воспроизведения и визуализации любой видео и аудио информации, получения и передачи электронных документов. Типовая комплектация мультимедийной аудитории состоит из: мультимедийного проектора, автоматизированного проекционного экрана, акустической системы, а также интерактивной трибуны преподавателя, включающей тач-скрин монитор с диагональю не менее 22 дюймов, персональный компьютер (с техническими характеристиками не ниже Intel Core i3-2100, DDR3 4096Mb, 500Gb), конференц-микрофон, беспроводной микрофон, блок управления оборудованием, интерфейсы подключения: USB, audio, HDMI. Интерактивная трибуна преподавателя является ключевым элементом управления, объединяющим все устройства в единую систему, и служит полноценным рабочим местом преподавателя. Преподаватель имеет возможность легко управлять всей системой, не отходя от трибуны, что позволяет проводить лекции, практические занятия, презентации, вебинары, конференции и другие виды аудиторной нагрузки обучающихся в удобной и доступной для них форме с применением современных интерактивных средств обучения, в том числе с использованием в процессе обучения всех корпоративных ресурсов. Мультимедийная аудитория также оснащена широкополосным доступом в сеть интернет. Компьютерное оборудование имеет соответствующее лицензионное программное обеспечение.

Учебно-методическая литература для данной дисциплины имеется в наличии в электронно-библиотечной системе "БиблиоРоссика", доступ к которой предоставлен студентам. В ЭБС "БиблиоРоссика" представлены коллекции актуальной научной и учебной литературы по гуманитарным наукам, включающие в себя публикации ведущих российских издательств гуманитарной литературы, издания на английском языке ведущих американских и европейских издательств, а также редкие и малотиражные издания российских региональных вузов. ЭБС "БиблиоРоссика" обеспечивает широкий законный доступ к необходимым для образовательного процесса изданиям с использованием инновационных технологий и соответствует всем требованиям федеральных государственных образовательных стандартов высшего профессионального образования (ФГОС ВПО) нового поколения.

Учебно-методическая литература для данной дисциплины имеется в наличии в электронно-библиотечной системе Издательства "Лань", доступ к которой предоставлен студентам. ЭБС Издательства "Лань" включает в себя электронные версии книг издательства "Лань" и других ведущих издательств учебной литературы, а также электронные версии периодических изданий по естественным, техническим и гуманитарным наукам. ЭБС Издательства "Лань" обеспечивает доступ к научной, учебной литературе и научным периодическим изданиям по максимальному количеству профильных направлений с соблюдением всех авторских и смежных прав.

Спецпрактикум "Магнитные материалы и гетероструктуры"

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВПО и учебным планом по направлению 011200.62 "Физика" и профилю подготовки не предусмотрено .

Автор(ы):

Парфенов В.В. \_\_\_\_\_

"\_\_" \_\_\_\_\_ 201\_\_ г.

Рецензент(ы):

Деминов Р.Г. \_\_\_\_\_

"\_\_" \_\_\_\_\_ 201\_\_ г.