

МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
(ФГБОУ ВО «ВГУ»)

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой  
физики твердого тела и наноструктур



(Домашневская Э.П.)

31.08.2019 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**  
**Б1.В.ДВ.05.03 Низкоразмерные электронные системы**

1. Код и наименование направления подготовки:

03.03.02 Физика

2. Профиль подготовки:

Ядерная и медицинская физика

3. Квалификация (степень) выпускника: Бакалавр

4. Форма обучения: Очная

5. Кафедра, отвечающая за реализацию дисциплины: кафедра физики твердого тела и наноструктур

6. Составители программы: Лихачев Е.Р., к.ф.-м.н.

7. Рекомендована:

НМС физического факультета ВГУ протокол № 6 от 26.06.2019 г.

8. Учебный год: 2019-2020

Семестр(ы): 8

## 9. Цели и задачи учебной дисциплины:

*Цели учебной дисциплины* – формирование у обучающихся знаний о физических свойствах электронных систем пониженной размерности, о влиянии понижения размерности на физические явления, о новых эффектах, появляющихся при понижении размерности.

*Задачи учебной дисциплины:*

- изучить физические свойства электронных систем пониженной размерности;
- рассмотреть влияние понижения размерности на физические явления;
- познакомиться с новыми эффектами, появляющимися при понижении размерности.

**10. Место учебной дисциплины в структуре ООП:** Дисциплина «Низкоразмерные электронные системы» является дисциплиной по выбору вариативной части блока Б1. Дисциплина «Низкоразмерные электронные системы» основывается на дисциплинах «Физика конденсированного состояния» и «Квантовая механика и статистическая физика».

**11. Планируемые результаты обучения по дисциплине/модулю (знания, умения, навыки), соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями выпускников):**

Компетенция		Планируемые результаты обучения
Код	Название	
ПК-4	способностью применять на практике профессиональные знания и умения, полученные при освоении профильных физических дисциплин	знать: - основные типы низкоразмерных структур; - основные эффекты, возникающие при понижении размерности; - основные направления практического использования низкоразмерных систем в современных областях техники; уметь: - рассчитывать параметры низкоразмерных структур; владеть (иметь навык(и)): - понятийным аппаратом в области физики низкоразмерных систем

**12. Объем дисциплины в зачетных единицах/час.(в соответствии с учебным планом) — 3/108.**

**Форма промежуточной аттестации экзамен**

## 13. Виды учебной работы

Вид учебной работы	Трудоемкость			
	Всего	По семестрам		
		8 семестр		
Аудиторные занятия	26	26		
в том числе: лекции	26	26		
практические				
лабораторные				
Самостоятельная работа	46	46		

Контроль	36	36		
Форма промежуточной аттестации	экзамен	экзамен		
Итого:	108	108		

### 13.1. Содержание дисциплины

п/п	Наименование раздела дисциплины	Содержание раздела дисциплины
<b>1. Лекции</b>		
1.1	Особенности энергетического спектра частиц в системах пониженной размерности.	Электрон в бесконечно глубокой прямоугольной потенциальной яме. Принцип размерного квантования и квантовое ограничение. Условия наблюдения квантовых размерных эффектов. Структуры с низкоразмерным электронным газом: квантовые пленки, квантовые нити, квантовые точки. Подзона размерного квантования. Двумерный, одномерный и нульмерный электронный газ. Плотность состояний в электронных системах с пониженной размерностью. Основные типы систем с двумерным электронным газом: полупроводниковые и полуметаллические пленки МДП-структуры, гетероструктуры, дельта-слои. Зонные диаграммы МДП-структуры, одиночного гетероперехода, дельта-слоя. Сверхрешетки. Минизоны.
1.2	Планарный перенос носителей заряда в системах пониженной размерности.	Планарный перенос в квантовых ямах. Механизмы рассеяния в системах пониженной размерности: рассеяние на ионизированных примесях, рассеяние на фонах, сплавное рассеяние, рассеяние на стенках квантовой ямы, межподзонное рассеяние. Модулированное легирование. Вероятность межподзонного рассеяния. Диффузионный и баллистический транспорт носителей заряда. Роль контактов в низкоразмерных структурах. Кондактанс баллистического проводника. Квантование кондактанса. Структуры с расщепленным затвором. Формула Ландауэра. Интерференция электронных волн. Слабая локализация. Подавление слабой локализации магнитным полем. Универсальные флуктуации кондактанса. Магнитный эффект Ааронова-Бома. Целочисленный квантовый эффект Холла. Уровни Ландау. Зоны расширенных состояний. Локализованные состояния. Дробный квантовый эффект Холла. Жидкость Лафлина.
1.3	Вертикальный перенос носителей заряда в системах пониженной размерности.	Вертикальный перенос в системе квантовых ям. Туннельный эффект. Кулоновская блокада. Одноэлектронное туннелирование. Пороговое напряжение кулоновской блокады. Одно- и двухбарьерные туннельные структуры. Кулоновская лестница. Сотуннелирование: упругое и неупругое. Одноэлектроника. Резонансное туннелирование. Резонансно-туннельные структуры. Отрицательное дифференциальное сопротивление.
1.4	Применение низкоразмерных электронных систем в приборах наноэлектроники и оптоэлектроники.	Транзисторы с высокой подвижностью носителей заряда. Приборы на основе баллистического транспорта и интерференционных эффектов. Приборы на основе одноэлектронного туннелирования. Приборы на основе резонансного туннелирования. Лазеры с квантовыми ямами и точками. Оптические модуляторы. Фотоприемники на квантовых ямах.
<b>2. Практические занятия</b>		
<b>3. Лабораторные работы</b>		

### 13.2. Темы (разделы) дисциплины и виды занятий

№ п/п	Наименование темы (раздела) дисциплины	Виды занятий (часов)				Всего
		Лекции	Практические	Лабораторные	Самостоятельная работа	
1	Особенности энергетического спектра частиц в системах пониженной размерности.	8			14	22
2	Планарный перенос носителей заряда в системах пониженной размерности.	8			14	22
3	Вертикальный перенос носителей заряда в системах пониженной размерности.	6			12	18
4	Применение низкоразмерных электронных систем в приборах наноэлектроники и оптоэлектроники.	4			6	10
5	Контроль					36
	Итого:	26	0	0	46	108

### 14. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины

*(рекомендации обучающимся по освоению дисциплины: работа с конспектами лекций, презентационным материалом, выполнение практических заданий, тестов, заданий текущей аттестации и т.д.)*

Изучение дисциплины «Низкоразмерные электронные системы» предусматривает осуществление учебной деятельности, состоящей из двух частей: обучения студентов преподавателем и самостоятельной учебной деятельности студентов по изучению дисциплины.

Самостоятельная работа студентов наряду с аудиторной представляет одну из форм учебного процесса и является существенной ее частью, что наиболее ярко представлено в процессе подготовки магистров. Последнее обусловлено тем, что самостоятельная работа предназначена для формирования навыков самостоятельной работы как вообще, так и в учебной, научной деятельности, формирование и развитие способности принимать на себя ответственность, самостоятельно решать проблему, находить конструктивные решения, выход из кризисной ситуации и т.д.

Самостоятельная работа формирует самостоятельность не только как совокупность умений и навыков, но и как черту характера, играющую существенную роль в структуре личности современного специалиста высшей квалификации. Она воспитывает самостоятельность как черту характера. Никакие знания, полученные на уровне пассивного восприятия, не ставшие объектом собственной умственной или практической работы, не могут считаться подлинным достоянием человека.

Давая возможность расширять и обогащать знания, умения по индивидуальным направлениям, самостоятельная работа студента позволяет создать разносторонних специалистов. В процессе самостоятельной работы развивают творческие возможности обучающегося, при этом самостоятельная работа завершает задачи всех видов учебной работы.

Самостоятельная работа - это планируемая работа студентов, выполняемая по заданию и при методическом руководстве преподавателя, но без его непосредственного участия. Преподаватель, ведущий занятия, организует, направляет самостоятельную работу студентов и оказывает им необходимую помощь. Однако самостоятельность студентов должна превышать объем работы, контролируемой преподавателем работы, и

иметь в своей основе индивидуальную мотивацию обучающегося по получению знаний, необходимых и достаточных для будущей профессиональной деятельности в избранной сфере. Преподаватель при необходимости может оказывать содействие в выработке и коррекции данной мотивации, лежащей в основе построения самостоятельной деятельности студента по изучению дисциплины, получению необходимых знаний и навыков.

Получение образования предполагает обучение решению задач определенной сферы деятельности. Однако, как бы хорошо не обучались учащиеся способам решения задач в аудитории, сформировать средства практической деятельности не удастся, так как каждый случай практики особый и для его решения следует выработать особый профессиональный стиль мышления.

Основой самостоятельной работы служит научно-теоретический курс, комплекс полученных студентом знаний. Основной, наиболее экономичной формой получения и усвоения информации, теоретических знаний в вузе является лекция, позволяющая воспринять значительную сумму основных знаний и потому способствующая повышению продуктивности всех других форм учебного труда.

Результат обучения и самостоятельной работы студента предполагает наличие следующих составляющих:

- понимание методологических основ построения изучаемых знаний;
- выделение главных структур учебного курса;
- формирование средств выражения в данной области;
- построение методик решения задач и ориентации в проблемах (ситуациях).

В учебном процессе используются следующие образовательные технологии (по образовательным формам): лекции и индивидуальные занятия. По преобладающим методам и приемам обучения: объяснительно-иллюстративные (объяснение, показ-демонстрация учебного материала и др.); активные (анализ учебной и научной литературы, составление схем и др.) и интерактивные, в том числе и групповые (взаимное обучение в форме подготовки и обсуждения докладов); информационные; компьютерные; мультимедийные (работа с сайтами академических структур, научно-исследовательских организаций, электронных библиотек и др., разработка презентаций, сообщений и докладов, работа с электронными обучающими программами и т.п.).

Подготовка к лекциям является одним из видов самостоятельной работы студентов-магистров. Студентам, чтобы хорошо овладеть учебным материалом, необходимо выработать навыки правильной и планомерной работы. Перед началом лекционных занятий надо просмотреть все, что было сделано в предыдущий раз. Это позволит сосредоточить внимание и восстановить в памяти уже имеющиеся знания по данному предмету. Кроме того, такой метод поможет лучше запомнить, как старое, так и новое, углубит понимание того и другого, так как при этом устанавливаются связи нового со старым, что является не только обязательным, но и основным условием глубокого овладения материалом. Чем детальнее изучаемое ассоциируется с известным ранее, тем прочнее сохраняется в памяти и быстрее вспомнить, когда требуется.

Приступая к изучению нового материала, необходимо сосредоточиться, т.е. сконцентрировать внимание и не отвлекаться от выполняемой работы, помня, что желание запомнить является гарантией успешной работы, отсутствие же воли к запоминанию снижает эффект восприятия.

Следует помнить о том, что через лекцию передается не только систематизированный теоретический материал, но и постигается методика научного исследования и умение самостоятельно работать, анализировать различного рода явления.

Записывать на лекции необходимо главное, не стремясь зафиксировать все слово в слово. Выбрать же главное без понимания предмета невозможно. Наличие собственного конспекта лекций позволяет еще раз ознакомиться, продумать, разобраться в новом материале, так как недостаточно хорошо понятые во время лекции положения могут быть

восстановлены в памяти, сопоставлены с другими, додуманы, дополнены, уяснены и расширены с помощью учебной литературы. Записи являются пособиями для повторения, дают возможность охватить содержание лекции и всего курса в целом.

При этом хорошо овладеть содержанием лекции - это:

- знать тему;
- понимать значение и важность ее в данном курсе;
- четко представлять план;
- уметь выделить основное, главное;
- усвоить значение примеров и иллюстраций;
- связать вновь полученные сведения о предмете или явлении с уже имеющимися;
- представлять возможность и необходимость применения полученных сведений.

Существует несколько общих правил работы на лекции:

- лекции по каждому предмету записывать удобнее в отдельных тетрадях, оставляя широкие поля для пометок;

- к прослушиванию лекций следует готовиться, что позволит в процессе лекции отделить главное от второстепенного;

- лекции необходимо записывать с самого начала, так как оно часто бывает ключом ко всей теме;

- так как дословно записать лекцию невозможно, то необходимо в конспекте отражать: формулы, определения, схемы, трудные места, мысли, примеры, факты и положения от которых зависит понимание главного, новое и незнакомое, неопубликованные данные, материал отсутствующий в учебниках и т.п.;

- записывать надо сжато;

- во время лекции важно непрерывно сохранять рабочую установку, умственную активность.

Изучение теоретического материала в данном курсе не ограничивается подготовкой к лекциям и работой на данном виде занятий. Лекционная часть курса органически взаимосвязана с иными видами работ: написанием рефератов, подбором, изучением, анализом и конспектированием рекомендованной литературы, подготовкой и сдачей экзамена по дисциплине, в структуре которых также большое значение имеет самостоятельная работа студента-магистра.

Самостоятельная работа студента при изучении дисциплины «Низкоразмерные электронные системы» включает в себя: подготовку и участие в изучении теоретической части курса, выполнение рефератов, подбор, изучение, анализ и конспектирование рекомендованной литературы, подготовку к экзамену.

## 15. Перечень основной и дополнительной литературы, ресурсов интернет, необходимых для освоения дисциплины

*(список литературы оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ и используется общая сквозная нумерация для всех видов источников)*

а) основная литература:

№ п/п	Источник
1	Борисенко В.Е. Нанoeлектроника / В. Е. Борисенко, А.И. Воробьева, Е.А. Уткина. - М.: Бином. Лаборатория знаний, 2009. - 223 с.
2	Щука А.А. Нанoeлектроника / А.А. Щука - М.: Физматкнига, 2007 - 463 с.
3	Нанoeлектроника. Ч. 1: Введение в нанoeлектронику / под ред. А.А. Орликовского. - М.: изд-во МГТУ им. Баумана, 2009. - 719 с.
4	Гуртов В.А. Твердотельная электроника / В.А. Гуртов. - М.: Техносфера, 2007. - 406 с.

б) дополнительная литература:

№ п/п	Источник
5	Шик А.Я. Физика низкоразмерных систем / А.Я. Шик, Л.Г. Бакуева, С.Ф. Мусихин, С.А. Рыков. - Санкт-Петербург: Наука, 2001. - 160 с.
6	Демиховский В.Я. Физика квантовых низкоразмерных структур / В.Я. Демиховский, Г.А. Вугальтер. - М.: Логос, 2000. - 246 с.

7	Драгунов В.П. Основы наноэлектроники / В.П. Драгунов, И.Г. Неизвестный, В.А. Гридчин. - М.: Физматкнига: Логос, 2006. - 494 с.
8	Гантмахер В.Ф. Электроны в неупорядоченных средах / В.Ф. Гантмахер. - М.: Физматлит, 2013. - 288 с.

в) информационные электронно-образовательные ресурсы (официальные ресурсы интернет)\*:

№ п/п	Ресурс
1.	<a href="http://www.elibrary.ru">http://www.elibrary.ru</a> - Научная электронная библиотека elibrary.ru: научные публикации в журналах по актуальным проблемам физики; материалы научных конференций.
2.	<a href="http://studopedia.ru/6_117176_tipi-nizkorazmernih-sistem-i-ih-svoystva.html">http://studopedia.ru/6_117176_tipi-nizkorazmernih-sistem-i-ih-svoystva.html</a> .
3.	<a href="http://www.ufn.ru/ru/news/">http://www.ufn.ru/ru/news/</a> - Новости физики в сети Internet.

\* Вначале указываются ЭБС, с которыми имеются договора у ВГУ, затем открытые электронно-образовательные ресурсы

**16. Перечень учебно-методического обеспечения для самостоятельной работы** (учебно-методические рекомендации, пособия, задачки, методические указания по выполнению практических (контрольных) работ и др.)

№ п/п	Источник
1	Борисенко В.Е. Наноэлектроника: теория и практика / В. Е. Борисенко, А.И. Воробьева, А.Л. Данилюк, Е.А. Уткина. - М.: Бинوم. Лаборатория знаний, 2013. - 366 с.

**17. Информационные технологии, используемые для реализации учебной дисциплины, включая программное обеспечение и информационно-справочные системы (при необходимости)**

№ п/п	Источник
1	<a href="http://www.lib.vsu.ru">http://www.lib.vsu.ru</a> - ЗНБ ВГУ
2	Федеральный портал «Российское образование» <a href="http://www.edu.ru">http://www.edu.ru</a>

**18. Материально-техническое обеспечение дисциплины:**

(при использовании лабораторного оборудования указывать полный перечень, при большом количестве оборудования можно вынести данный раздел в приложение к рабочей программе)

Для проведения компьютерных лекционных демонстраций, показа рисунков и графиков требуется персональный компьютер, мультимедийный проектор и экран.

**19. Фонд оценочных средств:**

**19.1. Перечень компетенций с указанием этапов формирования и планируемых результатов обучения**

Код и содержание компетенции (или ее части)	Планируемые результаты обучения (показатели достижения заданного уровня освоения компетенции посредством формирования знаний, умений, навыков)	Этапы формирования компетенции (разделы (темы) дисциплины или модуля и их наименование)	ФОС* (средства оценивания)
ПК-4	Знать: основные типы низкоразмерных структур; основные эффекты, возникающие при понижении размерности; основные направления практического использования низкоразмерных систем в современных областях техники	1-4	
	Уметь: рассчитывать параметры низкоразмерных структур	1-4	
	Владеть: понятийным аппаратом в области физики низкоразмерных систем	1-4	

Промежуточная аттестация	КИМ
--------------------------	-----

\* В графе «ФОС» в обязательном порядке перечисляются оценочные средства текущей и промежуточной аттестаций.

## 19.2 Описание критериев и шкалы оценивания компетенций (результатов обучения) при промежуточной аттестации

Для оценивания результатов обучения на экзамене используются следующие показатели (ЗУНы из 19.1):

- 1) знание основных типов низкоразмерных структур;
- 2) знание основных эффектов, возникающих при понижении размерности;
- 3) знание основных направлений практического использования низкоразмерных систем в современных областях техники;
- 4) умение рассчитывать параметры низкоразмерных структур;
- 5) владение понятийным аппаратом в области физики низкоразмерных систем.

Для оценивания результатов обучения на экзамене используется 4-балльная шкала: «отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно».

Соотношение показателей, критериев и шкалы оценивания результатов обучения.

Критерии оценивания компетенций	Уровень сформированности компетенций	Шкала оценок
<i>Полное соответствие ответа обучающегося всем перечисленным критериям. Продемонстрировано знание основных типов низкоразмерных структур, основных эффектов, возникающих при понижении размерности, основных направлений практического использования низкоразмерных систем в современных областях техники; умение рассчитывать параметры низкоразмерных структур; владение понятийным аппаратом в области физики низкоразмерных систем.</i>	<i>Повышенный уровень</i>	<i>Отлично</i>
<i>Ответ на контрольно-измерительный материал не соответствует любым двум из перечисленных показателей. Содержатся отдельные пробелы в знаниях, но обучающийся дает правильные ответы на дополнительные вопросы.</i>	<i>Базовый уровень</i>	<i>Хорошо</i>
<i>Ответ на контрольно-измерительный материал не соответствует любым трем из перечисленных показателей. Обучающийся демонстрирует частичные знания, дает неполные ответы на дополнительные вопросы.</i>	<i>Пороговый уровень</i>	<i>Удовлетворительно</i>
<i>Ответ на контрольно-измерительный материал не соответствует любым четырем из перечисленных показателей. Обучающийся демонстрирует отрывочные, фрагментарные знания, допускает грубые ошибки при ответе на дополнительные вопросы.</i>	<i>–</i>	<i>Неудовлетворительно</i>

## 19.3 Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности, характеризующие этапы формирования компетенций в процессе освоения образовательной программы

### 19.3.1 Перечень вопросов к экзамену:

1. Принцип размерного квантования и квантовое ограничение. Условия наблюдения квантовых размерных эффектов.
2. Квантовые пленки.
3. Квантовые нити и квантовые точки.
4. Основные типы систем с квантовыми ямами. МДП-структуры.
5. Гетероструктуры.

6. Сверхрешетки.
7. Механизмы рассеяния в системах пониженной размерности. Диффузионный и баллистический транспорт носителей заряда.
8. Диффузионный и баллистический транспорт носителей заряда
9. Баллистическая проводимость квантовых нитей.
10. Интерференция электронных волн.
11. Целочисленный квантовый эффект Холла.
12. Дробный квантовый эффект Холла.
13. Туннелирование электронов в условиях кулоновской блокады.
14. Резонансное туннелирование.
15. Приборы на основе баллистического транспорта и интерференционных эффектов.
16. Приборы на основе одноэлектронного туннелирования.
17. Приборы на основе резонансного туннелирования.
18. Приборы, используемые в оптоэлектронике.

#### **19.3.2 Перечень практических заданий**

#### **19.3.4 Тестовые задания**

#### **19.3.4 Перечень заданий для контрольных работ**

#### **19.3.5 Темы курсовых работ**

#### **19.3.6 Темы рефератов**

### **19.4. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности, характеризующих этапы формирования компетенций**

Оценка знаний, умений и навыков, характеризующая этапы формирования компетенций в рамках изучения дисциплины осуществляется в ходе текущей и промежуточной аттестаций.

Текущая аттестация проводится в соответствии с Положением о текущей аттестации обучающихся по программам высшего образования Воронежского государственного университета. Текущая аттестация проводится в форме устного опроса. Критерии оценивания приведены выше.

Промежуточная аттестация проводится в соответствии с Положением о промежуточной аттестации обучающихся по программам высшего образования.

Контрольно-измерительные материалы промежуточной аттестации включают в себя теоретические вопросы, позволяющие оценить уровень полученных знаний. Комплект КИМ состоит из 9 билетов, содержащих по 2 теоретических вопроса.

При оценивании используются количественные шкалы оценок. Критерии оценивания приведены выше.