

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

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой  
физики твердого тела и наноструктур



(Середин П.В.)  
01.03.2024 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ  
2.1.1.3 Физика полупроводников

1. Код и наименование направления подготовки:

03.06.01 Физика и астрономия - Аспирантура

2. Профиль подготовки:

Физика полупроводников

3. Квалификация выпускника: Исследователь. Преподаватель-

исследователь

4. Форма обучения: очная

5. Кафедра, отвечающая за реализацию дисциплины:

кафедра физики твердого тела и наноструктур

6. Составители программы:

Середин Павел Владимирович, доктор физико-математических наук, доцент

**7. Рекомендована:**

кафедрой физики твердого тела и наноструктур, протокол от 31.08.2024г. №1

---

**8. Учебный год:**2027/2028

**Семестр:** седьмой

## **9. Цели и задачи учебной дисциплины:**

Курс "Физика полупроводников" имеет своей задачей ознакомить слушателей с основными понятиями о типах дефектов в твердых телах, кинетическими и контактными явлениями в твердых телах, явлениями переноса.

Формирование базовых знаний в области методов и теории, обеспечивающих фундаментальные основы современных приложений в различных сферах деятельности.

Целями изучения дисциплины является:

- Углубление знаний по ряду теоретических проблем в области физики конденсированного состояния и знакомство с проблемами современной физики полупроводников, физического материаловедения;
- Изучение современной физики полупроводников, физического материаловедения;
- Приобретение опыта использования методов изучения свойств материалов

Задачи дисциплины заключаются в изучении:

- Фундаментальных понятий, законов и теорий, относящихся к физике полупроводников.
- Методов физических исследований физики конденсированного состояния

Для достижения задач, поставленных при изучении дисциплины, используется набор методических средств: учебная, учебно-методическая литература, информационные ресурсы библиотеки, электронные курсы и др.

Слушатель должен овладеть как универсальными (общенаучными), так и инструментальными компетенциями в области приложения методов теории и практики.

**10. Место учебной дисциплины в структуре ООП:** Физика полупроводников – область фундаментальной и прикладной науки и техники, включающая экспериментальные и теоретические исследования физических свойств полупроводниковых материалов и композитных структур на их основе (включая гетероструктуры, МОП структуры и барьеры Шоттки), а также происходящих в них физических явлений, разработку и исследование технологических процессов получения полупроводниковых материалов и композитных структур на их основе, создание оригинальных полупроводниковых приборов и интегральных устройств.

Данная программа строится на преемственности программ в системе высшего образования и предназначена для аспирантов ФГБОУ ВО ВГУ, прошедших обучение по программе подготовки магистров, прослушавших соответствующие курсы и имея по ним положительные оценки. Она основывается на положениях, отраженных учебных программах

указанных уровней. Для освоения дисциплины «Физика полупроводников и диэлектриков» требуются знания и умения, приобретенные обучающимися в результате освоения ряда предшествующих дисциплин (разделов дисциплин), таких как:

- Теоретическая физика
- Кристаллография
- Физика конденсированного состояния вещества
- Физические основы электроники

Для изучения данной дисциплины необходимы «входные» знания, умения, полученные в процессе обучения по программам специалитета или бакалавриата – магистратуры.

Дисциплина « Физика полупроводников и диэлектриков» необходима при подготовке выпускной квалификационной работы аспиранта и подготовке к сдаче государственного экзамена.

**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-21	владение современными методами исследования электронного строения твердых тел и наноструктур	<p><b>Знать:</b> основные понятия, связанные с физикой полупроводников, процессами переноса носителей заряда в полупроводниковых системах, с основными явлениями на контактах полупроводника с металлами, полупроводниками, диэлектриками, с применением этих явлений в приборных устройствах</p> <p><b>уметь:</b> применять полученные знания для анализа работы приборных объектов, использовать физические законы для предсказания поведения физических параметров полупроводниковых объемных и контактных приборов, оперировать физическими и технологическими терминами и величинами, анализировать задачи по переносу носителей</p>
ПК-22	способность проводить научные исследования с учетом магнитных свойств твердых тел	

		<p>заряда в полупроводниковых системах различной природы.</p> <p><b>владеть:</b> информацией об областях применения физики полупроводников в приборных системах; практическими приемами при работе с различными полупроводниками; методами измерения основных параметров полупроводников</p>
--	--	--

## 12. Объем дисциплины в зачетных единицах/час 4/144

Форма промежуточной аттестации Зачет

## 13. Виды учебной работы

Вид учебной работы	Трудоемкость			
	Всего	По семестрам		
		7 семестр	№ семестра	...
Контактная работа	18	18		
Самостоятельная работа	90	90		
Исследовательские задачи	18	18		
Форма промежуточной аттестации (экзамен.)	36	36		
Итого:	144	144		

### 13.1. Содержание дисциплины

п/п	Наименование раздела дисциплины	Содержание раздела дисциплины
<b>1. Контактная работа (подача материала)</b>		
1	Раздел 1	Предмет, цели и задачи курса. Основная терминология. Химическая связь и

		<p>атомная структура полупроводников. Электронная конфигурация внешних оболочек атомов и типы сил связи в твердых телах. Ван-дер-ваальсова, ионная и ковалентная связь. Структуры важнейших полупроводников – элементов AIV, AVI и соединений типов AШBV, APBVI, AIVBVI. Симметрия кристаллов. Трансляционная симметрия кристаллов. Базис и кристаллическая структура. Элементарная ячейка. Примитивная ячейка. Ячейка Вигнера — Зейтца. Решетка Браве. Обозначения узлов, направлений и плоскостей в кристалле. Обратная решетка, ее свойства. Зона Бриллюэна. Примеси и структурные дефекты в кристаллических и аморфных полупроводниках. Химическая природа и электронные свойства примесей. Точечные, линейные и двумерные дефекты.</p>
2	Раздел 2	<p>Основы технологии полупроводников и методы определения их параметров. Методы выращивания объемных монокристаллов из жидкой и газовой фаз. Методы выращивания эпитаксиальных пленок (эпитаксия из жидкой и газовой фазы). Молекулярно-лучевая эпитаксия. Металлорганическая эпитаксия. Методы легирования полупроводников. Основные методы определения параметров полупроводников: ширины запрещенной зоны, подвижности и концентрации свободных носителей, времени жизни неосновных носителей, концентрации и глубины залегания уровней примесей и дефектов.</p>
3	Раздел 3	<p>Основы зонной теории полупроводников. Основные приближения зонной теории. Волновая функция электрона в периодическом поле кристалла. Теорема Блоха. Зона Бриллюэна. Энергетические зоны. Законы дисперсии для важнейших полупроводников. Изоэнергетические поверхности. Тензор обратной</p>

		<p>эффективной массы. Плотность состояний. Особенности Ван-Хова. Уравнения движения электронов и дырок во внешних полях. Метод эффективной мас-сы. Искривление энергетических зон в электрическом поле. Движение электронов и дырок в магнитном поле. Определение эффективных масс из циклотронного (диамагнитного) резонанса. Связь зонной структуры с оптическими свойствами полупроводника. Уровни энергии, создаваемые примесными центрами в полупроводниках. Доноры и акцепторы. Мелкие и глубокие уровни. Водородоподобные примесные центры</p>
4	Раздел 4	<p>Равновесная статистика электронов и дырок в полупроводниках. Функция распределения электронов. Концентрация электронов и дырок в зонах, эффективная плотность состояний. Невырожденный и вырожденный электронный (дырочный) газ. Концентрации электронов и дырок на локальных уровнях. Факторы вырождения примесных состояний. Положение уровня Ферми и равновесная концентрация электронов и дырок в собственных и примесных (не-компенсированных и компенсированных) полупроводниках. Многозарядные примесные центры.</p>
5	Раздел 5	<p>Рекомбинация электронов и дырок в полупроводниках. Генерация и рекомбинация неравновесных носителей заряда. Квазиравновесие, квазиуровни Ферми. Уравнение кинетики рекомбинации. Времена жизни. Фотопроводимость. Механизмы рекомбинации. Излучательная и безызлучательная рекомбинация. Межзонная рекомбинация. Рекомбинация через уровни примесей и дефектов. Центры прилипания. Оже-рекомбинация. Пространственно-неоднородные неравновесные распределения носителей заряда. Длина диффузии неравновесных носителей заряда</p>

6	Раздел 6	<p>Оптические явления в полупроводниках. Комплексная диэлектрическая проницаемость, показатель преломления, коэффициент отражения, коэффициент поглощения. Связь между ними и соотношения Крамерса—Кронига. Межзонные переходы. Край собственного поглощения в случае прямых и непрямых, разрешенных и запрещенных переходов. Экситонное поглощение и излучение. Спонтанное и вынужденное излучение. Поглощение света на свободных носителях заряда. Поглощение света на колебаниях решетки. Рассеяние света колебаниями решетки, комбинационное рассеяние (Рамановское). Влияние примесей на оптические свойства. Примесная структура оптических спектров вблизи края собственного поглощения в прямозонных и непрямозонных полупроводниках. Межпримесная излучательная рекомбинация. Экситоны, связанные на примесных центрах. Фотоэлектрические явления. Примесная и собственная фотопроводимость. Термостимулированная проводимость. Фото-разогрев носителей заряда. Фотоэлектромагнитный эффект</p>
7	Раздел 7	<p>Полупроводниковые структуры пониженной размерности и сверхрешетки. Размерное квантование. Двумерные и квазидвумерные электронные системы и структуры, в которых они реализуются. Контра- и ковариантные композиционные сверхрешетки, легированные сверхрешетки легирования. Квантовые нити. Квантовые точки. Энергетический спектр электронов и плотность состояний в этих системах</p>

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

№	Наименование темы (раздела)	Виды занятий (часов)				
		Конт	Индивиду	Самостоят	Контроль	Всег

п/п	дисциплины	акт	льные занятия	ельная работа		о
	Раздел 1	2	2	12	4	20
	Раздел 2	2	2	12	4	20
	Раздел 3	2	2	12	4	20
	Раздел 4	2	2	12	4	20
	Раздел 5	3	3	14	6	26
	Раздел 6	3	3	14	6	26
	Раздел 7	3	3	14	6	26
	Итого:	18	18	90	36	144

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

В учебном процессе используются следующие образовательные технологии. По образовательным формам: лекции; лабораторные занятия; 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. 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 понятое 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 неизвестное, 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, участием в лабораторных занятиях, подготовкой и сдачей экзамена по дисциплине, в структуре которых также большое значение имеет самостоятельная работа студента.

Самостоятельная работа обучающихся наряду с аудиторной представляет одну из форм учебного процесса и является существенной ее частью, что наиболее ярко представлено в процессе подготовки бакалавров. 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 обучающегося 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 обучающихся, выполняемая по заданию и при методическом руководстве преподавателя, но без его непосредственного участия. Преподаватель, ведущий занятия, организует, направляет самостоятельную работу обучающихся и оказывает им необходимую помощь. Однако самостоятельность обучающихся 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 обучающегося по изучению дисциплины, получению необходимых знаний и навыков.

Получение образования предполагает обучение решению задач определенной сферы деятельности. Однако как бы хорошо не обучались обучающиеся 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 обучающимся 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 обучающегося 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).

Дисциплина «Физика полупроводников» реализуется с применением электронного обучения и дистанционных образовательных технологий.

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

а) основная литература:

№ п/п	Источник
1	<i>Шалимова, Клавдия Васильевна. Физика полупроводников : учебник / К.В. Шалимова .— Изд. 4-е, стер. — СПб. [и др.] : Лань, 2010 .— 390, [1] с. : ил. — (Учебники для вузов. Специальная литература) .— Предм. указ.: с.383-387. Свободный доступ <a href="http://elibrary.sgu.ru/uch_lit/565.pdf">http://elibrary.sgu.ru/uch_lit/565.pdf</a></i>
2	<i>Гуртов, Валерий Алексеевич. Твердотельная электроника : учебное пособие для студ. вузов, обуч. по направлению подготовки бакалавров, магистров 010700 "Физика" и специальности 010701 "Физика" / В. Гуртов .— 2-е изд., доп. — М. : Техносфера, 2007 .— 406 с. : ил. — (Мир электроники) .— Библиогр.: с.401-404 .— Предм. указ. : с.405-406.</i>

б) дополнительная литература:

№ п/п	Источник
1.	Суворов, Э. В. Материаловедение: методы исследования структуры и состава материалов : учебное пособие для академического бакалавриата / Э. В. Суворов. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2018. — 180 с. — (Высшее образование). — ISBN 978-5-534-06011-9. — Текст : электронный // ЭБС Юрайт [сайт]. — URL: <a href="https://urait.ru/bcode/410906">https://urait.ru/bcode/410906</a> (дата обращения: 10.09.2020).

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

№ п/п	Ресурс
1.	<i>Физика, химия, математика студентам и школьникам</i> Образовательный проект А.Н. Варгина Свободный доступ для скачивания Раздел Полупроводники <a href="http://www.ph4s.ru/book_ph_poluprovodnik.html">http://www.ph4s.ru/book_ph_poluprovodnik.html</a>
2.	<a href="https://edu.vsu.ru">https://edu.vsu.ru</a> – Образовательный портал "Электронный университет ВГУ"

## 16. Перечень учебно-методического обеспечения для самостоятельной работы

№ п/п	Источник
1.	<a href="http://www.lib.vsu.ru">www.lib.vsu.ru</a> - ЗНБ ВГУ

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

Необходимо пользоваться возможностью интерактивного проведения лекций, задавать вопросы, высказываться по проблематике материала. На занятиях выполнение учебных заданий осуществляется в аудитории и дома. Обязательно посещение текущих аттестаций. <https://edu.vsu.ru> – Образовательный портал "Электронный университет ВГУ"

## 18. Материально-техническое обеспечение дисциплины:

Лекционная аудитория. Реализация дисциплины с применением электронного обучения и дистанционных образовательных технологий осуществляется через образовательный портал "Электронный университет ВГУ".

## 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-21 ПК-22	<b>Знать:</b> основные с понятиями, связанные с физикой	Раздел 1 Раздел 2 Раздел 3	Устный опрос

	<p>полупроводников, процессами переноса носителей заряда в полупроводниковых системах, с основными явлениями на контактах полупроводника с металлами, полупроводниками, диэлектриками, с применением этих явлений в приборных устройствах</p> <p><b>уметь:</b> применять полученные знания для анализа работы приборных объектов, использовать физические законы для предсказания поведения физических параметров полупроводниковых объемных и контактных приборов, оперировать физическими и технологическими терминами и величинами, анализировать задачи по переносу носителей заряда в полупроводниковых системах различной природы.</p> <p><b>владеть:</b> информацией об областях применения физики полупроводников в приборных системах; практическими приемами при работе с различными полупроводниками; методами измерения основных параметров полупроводников</p>	Раздел 4	
		Раздел 5	
		Раздел 6	
		Раздел 7	

<b>Промежуточная аттестация - экзамен</b>			Перечень вопросов

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

Критерии оценивания компетенций	Уровень сформированности компетенций	Шкала оценок
Обучающийся в полной мере владеет понятийным аппаратом данной области науки (теоретическими основами дисциплины), способен иллюстрировать ответ примерами, фактами, данными научных исследований, применять теоретические знания для выполнения тестов решения практических задач	Повышенный уровень	Отлично
Обучающийся владеет понятийным аппаратом данной области науки (теоретическими основами дисциплины), допускает незначительные ошибки при выполнении тестов	Базовый уровень	Хорошо
Обучающийся владеет частично теоретическими основами дисциплины, фрагментарно способен проходить тестирование и выполнять задания	Пороговый уровень	Удовлетворительно
Неудовлетворительное выполнение тестовых заданий. Обучающийся демонстрирует отрывочные, фрагментарные знания, допускает грубые ошибки при выполнении практических задач	–	Неудовлетворительно

## 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. Химическая связь и атомная структура полупроводников. Электронная конфигурация внешних оболочек атомов и типы сил связи в твердых телах.

2. Ван-дер-ваальсова, ионная и ковалентная связь.

3. Структуры важнейших полупроводников – элементов AIV, A VI и соединений типов AIIIBV, AIIIBVI, AIVBVI.

4. Симметрия кристаллов. Трансляционная симметрия кристаллов. Базис и кристаллическая структура. Элементарная ячейка. Примитивная ячейка. Ячейка Вигнера — Зейтца. Решетка Браве. Обозначения узлов, направлений и плоскостей в кристалле. Обратная решетка, ее свойства. Зона Бриллюэна.

5. Примеси и структурные дефекты в кристаллических и аморфных полупроводниках. Химическая природа и электронные свойства примесей. Точечные, линейные и двумерные дефекты.

6. Методы выращивания объемных монокристаллов из жидкой и газовой фаз. Методы выращивания эпитаксиальных пленок (эпитаксия из жидкой и газовой фазы). Молекулярно-лучевая эпитаксия. Металлорганическая эпитаксия.

7. Методы легирования полупроводников. 8. Основные методы определения параметров полупроводников: ширины запрещенной зоны, подвижности и концентрации свободных носителей, времени жизни неосновных носителей, концентрации и глубины залегания уровней примесей и дефектов.

9. Основные приближения зонной теории. Волновая функция электрона в периодическом поле кристалла. Теорема Блоха. Зона Бриллюэна. Энергетические зоны.

10. Законы дисперсии для важнейших полупроводников.

11. Изоэнергетические поверхности. Тензор обратной эффективной массы. Плотность состояний. Особенности Ван-Хова.

12. Уравнения движения электронов и дырок во внешних полях. Метод эффективной массы. Искривление энергетических зон в электрическом поле. Движение электронов и дырок в магнитном поле.

13. Определение эффективных масс из циклотронного (диамагнитного) резонанса.

14. Связь зонной структуры с оптическими свойствами полупроводника. Уровни энергии, создаваемые примесными центрами в полупроводниках. Доноры и акцепторы. Мелкие и глубокие уровни. Водородоподобные примесные центры.

15. Равновесная статистика электронов и дырок в полупроводниках. Функция распределения электронов.

16. Концентрация электронов и дырок в зонах, эффективная плотность состояний. 6

17. Невырожденный и вырожденный электронный (дырочный) газ. Концентрации электронов и дырок на локальных уровнях. Факторы вырождения примесных состояний.

18. Положение уровня Ферми и равновесная концентрация электронов и дырок в собственных и примесных (некомпенсированных и компенсированных) полупроводниках. Многозарядные примесные центры.

19. Механизмы рассеяния носителей заряда в неидеальной решетке. Взаимодействие носителей заряда с акустическими и оптическими фононами. Рассеяние носителей заряда на заряженных и нейтральных примесях.

20. Рекомбинация электронов и дырок в полупроводниках. Генерация и рекомбинация неравновесных носителей заряда. Квазиравновесие, квазиуровни Ферми. Уравнение кинетики ре-комбинации. Времена жизни. Фотопроводимость.

21. Механизмы рекомбинации. Излучательная и безызлучательная рекомбинация. Межзонная рекомбинация. Рекомбинация через уровни примесей и дефектов. Центры прилипания. Оже-рекомбинация.

22. Пространственно неоднородные неравновесные распределения носителей заряда.

23. Оптические явления в полупроводниках. Комплексная диэлектрическая проницаемость, показатель преломления, коэффициент отражения, коэффициент поглощения. Связь между ними и соотношения Крамерса—Кронига. Межзонные переходы. Край собственного поглощения в случае прямых и непрямых, разрешенных и запрещенных переходов.

24. Экситонное поглощение и излучение. Спонтанное и вынужденное излучение. Поглощение света на свободных носителях заряда. Поглощение света на колебаниях решетки. Рассеяние света колебаниями решетки, комбинационное рассеяние на оптических фононах (Рамана).

25. Влияние примесей на оптические свойства. Примесная структура оптических спектров вблизи края собственного поглощения в прямозонных и непрямозонных полупроводниках.

26. Фотоэлектрические явления. Примесная и собственная фотопроводимость. Влияние прилипания неравновесных носителей заряда на фотопроводимость. Оптическая перезарядка локальных уровней и связанные с ней эффекты. Термостимулированная проводимость. Фото-разогрев носителей заряда. Фотоэлектромагнитный эффект.

27. Полупроводниковые структуры пониженной размерности и сверхрешетки. Размерное квантование. Двумерные и квазидвумерные электронные системы и структуры, в которых они реализуются.

28. Квантовые нити. Квантовые точки. Энергетический спектр электронов и плотность состояний в этих системах.

29. Оптические явления в структурах с квантовыми ямами, правила отбора для межзонных и внутризонных (межподзонных) переходов. Межзонное поглощение и излучательная рекомбинация в этих структурах.

Электрические и гальваномагнитные явления в двумерных структурах.  
Эффект Шубникова-де Гааза.

30. Квантовый эффект Холла..

#### **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: выполнения лабораторных работ.

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 и степень сформированности умений и навыков.

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

#### **20.1 Фонд оценочных средств сформированности компетенций студентов, рекомендуемый для проведения диагностических работ:**

1. Проводимость материала при абсолютном нуле температуры равна нулю. Этот материал:

- а). Метал
- б). Диэлектрик
- в). Полупроводник
- г). Полупроводник или диэлектрик

2. Какое из предположений не используется в зонной теории?

- а). Все ядра расположены строго периодически в пространстве
- б). Взаимодействие электронов друг с другом заменяется некоторым эффективным внешним полем
- в). Атомные ядра считаются неподвижными
- г). Электроны не взаимодействуют друг с другом

3. Выражение для среднего значения скорости  $\mathbf{v}$  электрона в идеальном кристалле имеет вид ( $\mathbf{p}$  – квазиимпульс,  $m_0$  – масса свободного электрона,  $E(\mathbf{p})$  – энергия электрона):

а).  $\mathbf{v}=\mathbf{p}/m_0$

б).  $\mathbf{v}=\nabla E(\mathbf{p})$

г).  $v=\sqrt{2m_0E(\mathbf{p})}$

д).  $\mathbf{v}=0$ , поскольку электрон не находится во внешнем поле

4. Какой полупроводник называется собственным?

а). Это чистый нелегированный полупроводник

б). Это материал, в котором энергия носителей заряда отвечает собственным значениям уравнения Шредингера

в). Это полупроводник, в котором концентрация собственных дефектов определяет концентрацию носителей заряда

5. От каких параметров зависит концентрация электронов в зоне проводимости

а). От температуры

б). От концентрации донорной примеси

в). От ширины запрещенной зоны полупроводника

г). Одновременно от концентрации донорной примеси и от температуры

6. В какой из половин запрещенной зоны находится уровень Ферми в собственном полупроводнике?

а). Ближе к дну зоны проводимости

б). Ближе к потолку валентной зоны

в). На самом дне зоны проводимости

г). Почти посередине запрещенной зоны

7. Понятие дырки в полупроводнике

а). Это дефект в решетке полупроводникового кристалла (вакансия)

б). Носитель положительного заряда, равного по величине элементарному заряду электрона, в полупроводниках.

в). Отсутствие электрона на связи атома акцепторной примеси

г). Положительно заряженный атом примеси в междоузлии

кристалла

8. Понятие эффективной массы в полупроводниковом кристалле

а). Это масса колеблющегося атома в узле кристаллической решетки

б). Это масса связанной электронно-дырочной пары

- в). Это величина, имеющая размерность массы и применяемая для описания движения электрона в периодическом потенциале кристалла
- г). Это параметр, описывающий среднее электрон-электронное взаимодействие в полупроводниковом кристалле

9. Что такое плотность электронных состояний в полупроводнике?

- а). Количество электронных состояний в единице объема полупроводника
- б). Число электронных состояний в зоне проводимости
- в). Количество электронных состояний на поверхности кристалла полупроводника
- г). Число электронных состояний, приходящихся на интервал энергии  $dE$  и на единичный объем кристалла

10. Какова энергия ионизации примесных атомов, используемых для легирования полупроводников?

- а). Обычно составляет величину порядка нескольких сотых – одной десятой эВ
- б). Равна половине ширины запрещенной зоны полупроводника
- в). Этот параметр зависит от природы полупроводника
- г). Она определяется чисто энергией ионизации атомов примеси

11. Под уравнением электронейтральности полупроводника понимается:

- а). Равенство концентрации электронов и дырок в полупроводнике
- б). Равенство концентрации донорных и акцепторных примесей
- в). Равенство эффективной плотности состояний в валентной зоне и зоне проводимости
- г). Равенство суммы положительных и отрицательных зарядов в объеме полупроводника

12. Эффект Холла в полупроводниках увеличивается:

- а). С ростом индукции поперечного магнитного поля
- б). С увеличением концентрации носителей заряда в полупроводниках
- в). С уменьшением размера образца анализируемого полупроводника
- г). С ростом температуры полупроводника

13. Подвижность носителей заряда в полупроводниках уменьшается:

- а). С увеличением проводимости полупроводника
- б). В собственном полупроводнике по сравнению с легированным материалом
- в). При увеличении температуры полупроводникового кристалла

г). С ростом количества дефектов в кристаллической решетке полупроводника

14. Чем прямозонный полупроводниковый кристалл отличается от непрямоzonного кристалла?

а). Эффективная плотность состояний в прямозонном материала ниже

б). Более крутой край оптического поглощения в непрямоzonном полупроводнике

в). Эффективная масса электрона в непрямоzonном полупроводнике выше

г). В прямозонном полупроводнике минимум энергии в зоне проводимости

совпадает в  $k$ -пространстве с максимумом энергии в валентной зоне

15. Какой физический смысл имеет удельная электропроводность?

а). Она служит коэффициентом пропорциональности между плотностью тока и

напряженностью внешнего электрического поля, приложенного к полупроводнику.

б). Это проводимость единицы объема полупроводника

в). Она связывает наблюдаемую электропроводность с удельным весом полу-

проводникового материала

г). Она определяет концентрацию носителей заряда в полупроводнике при

повышении температуры полупроводника

16. Найти эффективную плотность состояний зоны проводимости ( $N_c$ ) в арсениде галлия

( $m_e^* = 0.067 m_0$ , где  $m_0$  — масса электрона в вакууме) при температуре 100 К, если

известно, что для материала с  $m_e^* = m_0$  при  $T = 300$  К  $N_c = 2.5 \cdot 10^{19}$  см<sup>-3</sup>.

17. Концентрация электронов проводимости в германии при комнатной температуре

$n = 3 \cdot 10^{19}$  м<sup>-3</sup>. Плотность германия 5400 кг/м<sup>3</sup>, молярная масса германия 0,073 кг/моль.

Каково отношение числа электронов проводимости к общему числу атомов?

18. По тонкой кремниевой пластинке шириной  $l = 3,2$  мм и толщиной  $d = 250$  мкм течет ток  
 $I = 5,2$  мА. Кремний содержит примеси фосфора и является полупроводником n-типа.  
заряда в чистом кремнии. Для данного образца концентрация электронов составляет  
 $n_e = 1,5 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$ . Определите среднюю дрейфовую скорость электронов.
19. Удельное сопротивление собственного германия  $\rho = 0.43$  Ом·м при  $T = 300$  К. Подвижности электронов и дырок в германии равны соответственно  $0.39$  и  $0.19$  м<sup>2</sup>/(В·с). Определите собственную концентрацию электронов ( $n$ ) и дырок ( $p$ ).
20. Определить концентрацию носителей заряда в чистом германии при  $T = 300$  К.  
На сколько градусов нужно повысить температуру от начальной ( $300$  К), чтобы число электронов проводимости в германии увеличилось вдвое.
21. Определить ток, протекающий через тонкую пленку, если известно, что этот ток ограничен пространственным зарядом, площадь контакта  $S = 1$  мм<sup>2</sup>, толщина пленки  
 $d = 1 \cdot 10^{-8}$  м,  $\mu_n = 20$  см<sup>2</sup>/Вс,  $\epsilon = 3,8$ ,  $U = 10$  мВ.
22. Определить уровень Ферми  $E_F$  в собственном полупроводнике, если энергия активации равна  $0,1$  эВ. За нулевой уровень отсчета кинетической энергии электронов принять дно зоны проводимости.
23. Определить концентрацию свободных носителей заряда в чистом кремнии при  $T = 300$  К.
24. Найти положение уровня Ферми в собственном полупроводнике относительно середины запрещенной зоны при  $T = 300$  К, если эффективная масса электрона в два раза больше эффективной массы дырки.
25. Во сколько раз изменится концентрация собственных носителей заряда в кремнии при увеличении его температуры с  $300$  до  $400$  К?

26. Найти положение уровня Ферми в собственном полупроводнике относительно середины запрещенной зоны при  $T = 300 \text{ K}$ , если эффективная масса электрона в два раза меньше эффективной массы дырки.
27. В чистом полупроводнике при  $T = 300 \text{ K}$  концентрация собственных носителей составляет  $1,5 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-3}$  эффективные массы электронов проводимости и дырок одинаковы. Определить  $E_F$ .
28. Какова вероятность найти электрон на дне зоны проводимости при  $T = 300 \text{ K}$  в собственном кремнии ( $E_g = 1,12 \text{ эВ}$ )?
29. Удельная проводимость кремния примесями равна  $112 \text{ См/м}$ . Определить подвижность дырок и их концентрацию, если постоянная Холла  $3,66 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{Кл}$ . Принять, что полупроводник обладает только дырочной проводимостью.
30. Определить удельное электрическое сопротивление кремния при температуре  $300 \text{ K}$  если концентрация донорной примеси равна  $10^{20} \text{ м}^{-3}$ . Подвижность электронов в кремнии при  $300 \text{ K}$  принять равной  $0,14 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ .