

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



УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой
физики полупроводников и микроэлектроники

(Е.Н.Бормонтов)

31.08.2022

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Б1.О.20 Физика полупроводников

1. Код и наименование направления подготовки/специальности:

11.03.04 Электроника и микроэлектроника

2. Профиль подготовки/специализация: Интегральная электроника и микроэлектроника

3. Квалификация (степень) выпускника: бакалавр

4. Форма обучения: очная

5. Кафедра, отвечающая за реализацию дисциплины: физики полупроводников и микроэлектроники

6. Составители программы: Бормонтов Евгений Николаевич, доктор физико-математических наук, профессор

7. Рекомендована: НМС физического факультета от 14.06.2022 , протокол № 6

8. Учебный год: 2024-2025

Семестр(ы): 6

9. Цели и задачи учебной дисциплины:

Целями освоения учебной дисциплины являются: формирование комплекса знаний и навыков, необходимых для успешного использования достижений изучаемой области науки в практической деятельности, получение представлений о физических идеях и принципах современной физики полупроводников.

Задачи учебной дисциплины:

- формирование базового комплекса знаний о физических свойствах, процессах и явлениях (эффектах) в полупроводниках и особенностях полупроводниковых электронных систем;
- получение знаний о существующих теориях различных физических явлений и основных областях применения полупроводниковых структур;
- рассмотрение основных особенностей полупроводников, классификация полупроводниковых материалов, модельные представления о проводимости в полупроводнике;
- получение знаний об основных положениях зонной теории;
- изучение статистики равновесных носителей заряда в полупроводниках;
- изучение кинетических явлений в полупроводниках, диффузия и дрейф;
- получение знаний о контактных явлениях в полупроводниках;
- изучение поверхностных свойств полупроводников;
- освоение методов экспериментальных исследований параметров и характеристик полупроводников, приборов и устройств на их основе;
- сформировать умение применять теоретические знания по физике полупроводников при решении конкретных прикладных задач.

10. Место учебной дисциплины в структуре ОПОП: блок Б1, обязательная часть,

Дисциплина включена в число обязательных дисциплин блока Б1 по направлению подготовки **11.03.04 Электроника и наноэлектроника**.

Для ее усвоения требуются знания, формируемые при освоении математических дисциплин, дисциплин общей физики, а также дисциплин: «Квантовая механика и статистическая физика», «Кристаллография и кристаллофизика», «Физика конденсированного состояния».

В результате прохождения данной дисциплины обучающийся должен приобрести знания, умения, навыки профессиональных компетенций, необходимых для обеспечения трудовых функций профессиональных стандартов 40.058 «Инженер-технолог по производству изделий микроэлектроники» и 40.035 «Инженер-конструктор аналоговых сложно-функциональных блоков (СФ-блоков)».

Знания, полученные при освоении дисциплины «Физика полупроводников», необходимы для освоения общепрофессиональных и профессиональных дисциплин: «Основы технологии электронной компонентной базы», «Твердотельная электроника», «Наноэлектроника», «Физика МДП-систем», а также при выполнении научно-исследовательских работ, учебной и производственной проектно-конструкторских практик, написания выпускной квалификационной работы в области микро- и наноэлектроники.

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

Компетенции		Индикаторы		Планируемые результаты обучения
Код	Наименование компетенции	Код(ы)	Наименование индикатора(ов)	
ОПК-1	Способен использовать положения, законы и методы естественных наук и математики для решения задач инженерной деятельности	ОПК-1.1	Демонстрирует знания фундаментальных законов природы и основных физических и математических законов	<p><i>Знать:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - фундаментальные законы природы и основные физические математические законы; <p><i>Уметь:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - понимать главные проблемы и задачи современной физики полупроводников <p><i>Владеть:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> методами естественных наук и математики в приложении к решению задач физики полупроводников
		ОПК-1.2	Применяет физические законы и математические методы для решения задач теоретического и прикладного характера	<p><i>Знать:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - существующие теории различных физических явлений и процессов, происходящих в полупроводниковых структурах <p><i>Уметь:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - применять физические законы и математические методы для решения задач теоретического и прикладного характера
		ОПК-1.3	Использует положения, законы и методы естественных наук для решения инженерных задач в сфере профессиональной деятельности	<p><i>Знать:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - основные представления о физических идеях и принципах современной физики полупроводников <p><i>Уметь:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - использовать полученные теоретические знания и умения для решения конкретных инженерных и прикладных задач;
ОПК-2	Способен самостоятельно проводить экспериментальные исследования и использовать основные приемы обработки и представления полученных данных	ОПК-2.4	Выбирает способы и средства измерений для проведения экспериментальных исследований	<p><i>Знать:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - кинетические и контактные явления в твердых телах, фотоэлектрические и поверхностные явления; <p><i>Уметь:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - пользоваться основными формулами для оценок величин, характеризующих кинетические явления в полупроводниках и неравновесные носители заряда <p><i>Владеть:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - методиками измерений и методами расчетов параметров и характеристик приборов и устройств твердотельной электроники и микроэлектроники

12. Объем дисциплины в зачетных единицах/час. — 5 / 180.

Форма промежуточной аттестации: экзамен

13. Виды учебной работы

Вид учебной работы		Трудоемкость	
		Всего	По семестрам
			6 семестр
Аудиторные занятия		64	64
в том числе:	лекции	34	16
	практические	16	14
	лабораторные	16	34
Самостоятельная работа		80	80
Форма промежуточной аттестации <i>экзамен</i>		36	36
Итого:		180	180

13.1. Содержание дисциплины

№ п/п	Наименование раздела дисциплины	Содержание раздела дисциплины	Реализация раздела дисциплины с помощью онлайн-курса, ЭУМК
1. Лекции			
1.1	Введение	Предмет и задачи курса. Краткий исторический очерк развития. Классификация твердых тел по физическим свойствам. Основные особенности полупроводников	
1.2	Кинетические явления в полупроводниках	Кинетическое уравнение Больцмана. Интеграл столкновений. Зависимость времени релаксации от энергии и температуры при различных механизмах рассеяния. Неравновесная функция распределения носителей заряда. Плотность тока и плотность потока энергии. Электропроводность полупроводников и ее температурная зависимость. Механизмы изменения концентрации свободных носителей в сильных полях. Эффект Ганна. Теплопроводность и термоэлектрические явления в полупроводниках. Коэффициент теплопроводности, обусловленной свободными носителями. Явления Зеебека, Пельтье и Томсона. Зависимость дифференциальной термо-ЭДС от температуры и степени легирования. Связи между термоэлектрическими коэффициентами. Термоэлектрическая эффективность. Гальвано- и термомагнитные эффекты в полупроводниках	
1.3	Генерация и рекомбинация носителей заряда в полупроводниках	Неравновесные носители заряда. Квазиравновесие, квазиуровни Ферми. Типы и механизмы рекомбинации. Уравнение непрерыв-	

		ности. Биполярная и монополярная генерация и рекомбинация. Максвелловское время релаксации. Линейная и квадратичная рекомбинация. Время жизни. Центры рекомбинации и ловушки. Рекомбинация носителей через локальные центры. Статистика Шокли-Рида. Зависимость времени жизни от положения уровня Ферми и температуры	
1.4	Диффузия и дрейф неравновесных носителей	Диффузионный и дрейфовый токи. Подвижность и коэффициент диффузии. Соотношение Эйнштейна. Пространственно-неоднородные неравновесные распределения носителей заряда. Уравнение диффузии. Диффузия в монополярном полупроводнике. Амбиполярные диффузия и дрейф. Длины диффузии и дрейфа	
1.5	Контактные явления в полупроводниках	Равновесные энергетические диаграммы барьеров Шоттки и Мотта. Модель обедненного приконтактного слоя. Контакт металл-полупроводник при наличии внешнего смещения. ВАХ идеального контакта металл-полупроводник (диодная теория выпрямления). Диффузионная теория выпрямления. ВАХ реального контакта Шоттки. Эффект Шоттки. Влияние поверхностных состояний на контактные явления. Пиннинг уровня Ферми. Физические свойства и ВАХ $p-n$ -перехода	
1.6	Фотоэлектрические явления в полупроводниках	Внутренний фотоэффект. Кинетика фотопроводимости Фотовольтаические эффекты: эффект Дембера, фотогальванический эффект (вентильный эффект на контакте Шоттки и $p-n$ -переходе), ФЭМ-эффект.	
1.7	Поверхностные свойства полупроводников	Понятие идеальной и реальной поверхности. Природа и классификация локализованных состояний, связанных с поверхностью. Приповерхностная область пространственного заряда (ОПЗ). Энергетическая диаграмма, основные параметры и разновидности приповерхностной ОПЗ полупроводника. Расчет параметров ОПЗ. Поверхностная проводимость и эффект поля.	
2. Практические занятия			
2.1	Введение	Практическое занятие 1. Классификация полупроводниковых материалов. Модельные представления о проводимости в полупроводнике.	-
2.2	Кинетические явления в полупроводниках	Практическое занятие 2. Кинетическое уравнение Больцмана. Электропроводность полупроводников и ее температурная зависимость. Практическое занятие 3. Механизмы изменения концентрации свободных носителей в сильных полях. Эффект Ганна. Теплопроводность и термоэлектрические явления в полупроводниках. Коэффициент теплопро-	-

		водности, обусловленной свободными носителями. Практическое занятие 4. Явления Зеебека, Пельтье и Томсона.	
2.3	Генерация и рекомбинация носителей заряда в полупроводниках	Практическое занятие 5. Неравновесные носители заряда. Уравнение непрерывности. Биполярная и монополярная генерация и рекомбинация.	-
2.4	Диффузия и дрейф неравновесных носителей	Практическое занятие 6. Диффузионный и дрейфовый токи. Подвижность и коэффициент диффузии. Соотношение Эйнштейна. Уравнение диффузии. Диффузия в монополярном полупроводнике. Амбиполярные диффузия и дрейф. Длины диффузии и дрейфа.	Диффузия и дрейф носителей заряда https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=4469#section-1
2.5	Контактные явления в полупроводниках	Практическое занятие 7. Равновесные энергетические диаграммы барьеров Шоттки и Мотта. Модель обедненного контактного слоя. Контакт металл-полупроводник при наличии внешнего смещения. ВАХ идеального контакта металл-полупроводник (диодная теория выпрямления). Диффузионная теория выпрямления	Контактные явления металл-полупроводник https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=4469#section-2
2.6	Фотоэлектрические явления в полупроводниках	Практическое занятие 8. Внутренний фотоэффект. Кинетика фотопроводимости. Фотовольтаические эффекты: эффект Дембера, фотогальванический эффект (вентильный эффект на контакте Шоттки и $p-n$ -переходе), ФЭМ-эффект.	Фото-ЭДС в полупроводниках https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=4469#section-3
2.7	Поверхностные свойства полупроводников	Практическое занятие 9. Понятие идеальной и реальной поверхности. Природа и классификация локализованных состояний, связанных с поверхностью. Приповерхностная область пространственного заряда (ОПЗ). Энергетическая диаграмма, основные параметры и разновидности приповерхностной ОПЗ полупроводника. Расчет параметров ОПЗ. Поверхностная проводимость и эффект поля.	Поверхностные явления в полупроводниках https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=4469#section-4
3. Лабораторные работы			
3.1	Введение	Лабораторная работа №1. Моделирование зонной структуры полупроводников Лабораторная работа №2. Моделирование статистических свойств электронов и дырок в полупроводниках	-
3.2	Кинетические явления в полупроводниках	Лабораторная работа №3. Определение типа проводимости полупроводника Лабораторная работа №4. Определение удельного сопротивления полупроводников четырехзондовым методом. Лабораторная работа №9. Изучение эффекта Зеебека в полупроводниках. Лабораторная работа №10. Изучение эффекта Пельтье в полупроводниках	Определение типа проводимости полупроводника https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=4455#section-1 Определение

			удельного сопротивления полупроводника четырехзондовым методом https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=4455#section-2
3.3	Генерация и рекомбинация носителей заряда в полупроводниках	Лабораторная работа №7. Внутренний фотоэффект в полупроводниках	Внутренний фотоэффект https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=4455#section-5
3.4	Диффузия и дрейф неравновесных носителей	Лабораторная работа №8. Измерение параметров полупроводников с помощью эффекта Холла	Эффект Холла https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=4455#section-4
3.5	Контактные явления в полупроводниках	Лабораторная работа №5. Изучение выпрямляющих свойств контакта Шоттки. Лабораторная работа №6. Изучение выпрямляющих свойств электронно-дырочного перехода	-
3.6	Фотоэлектрические явления в полупроводниках	Лабораторная работа №7. Внутренний фотоэффект в полупроводниках	Внутренний фотоэффект https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=4455#section-5
3.7	Поверхностные свойства полупроводников	Лабораторная работа №11. Моделирование поверхностных свойств полупроводников	-

13.2. Темы (разделы) дисциплины и виды занятий

№ п/п	Наименование темы (раздела) дисциплины	Виды занятий (часов)				
		Лекции	Практические	Лабораторные	Самостоятельная работа	Всего
1	Введение	2	2	2	10	16
2	Кинетические явления в полупроводниках	6	2	4	12	24
3	Генерация и рекомбинация носителей заряда в полупроводниках	4	2	2	12	20
4	Диффузия и дрейф неравновесных носителей	6	2	2	12	22
5	Контактные явления в полупроводниках	6	4	2	12	24
6	Фотоэлектрические явления в полупроводниках	6	2	2	10	20
7	Поверхностные свойства полупроводников	4	2	2	10	18
	Экзамен – 36 часов					36
	Итого:	34	16	16	78	180

14. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины

Изучение дисциплины «Физика полупроводников» предусматривает осуществление учебной деятельности состоящей из двух частей: обучения студентов преподавателем и самостоятельной учебной деятельности студентов по изучению дисциплины.

Подготовка к лекциям является одним из видов самостоятельной работы студентов. 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.

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 выделить 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, выполнением лабораторных работ, подготовкой и сдачей зачета по дисциплине, в структуре которых также большое значение имеет самостоятельная работа студента.

Самостоятельная работа студентов 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 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.

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).

Самостоятельная работа студента при изучении «Физика полупроводников» включает в себя: подготовку и участие в изучении теоретической части курса, подготовку к лабораторным занятиям, написание отчетов по лабораторным работам, подготовку к экзамену.

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

а) основная литература:

№ п/п	Источник
1	Шалимова К.В. Физика полупроводников [Электронный ресурс] : учебник / К.В. Шалимова .— Москва : Лань, 2010 .— 390 с. // Издательство «Лань» : электронно-библиотечная система. — URL : http://e.lanbook.com
2	Ансельм А.И. Основы статистической физики и термодинамики : учеб. пособие / А. И. Ансельм .— Москва : Лань, 2007 .— 423 с. // Издательство «Лань» : электронно-библиотечная система. — URL : http://e.lanbook.com

3	Ансельм А.И. Введение в теорию полупроводников : учеб. пособие / А.И. Ансельм .— Москва : Лань, 2008 .— 618 с. // Издательство «Лань» : Электронно-библиотечная система. — URL : http://e.lanbook.com
4	Легостаев Н.С. Материалы электронной техники / Н.С. Легостаев .— Томск : Эль Контент, 2012. — 184 с. // Электронно-библиотечная система. — URL : http://biblioclub.ru

б) дополнительная литература:

№ п/п	Источник
5	Грундман М. Основы физики полупроводников. Нанопластика и технические приложения = The Physics of semiconductors. An introduction including nanophysics and applications / М. Грундман ; [пер.с англ. : И.В. Ванюшина и др.] ; под ред. В.А. Гергеля .— 2-е изд. — Москва : Физматлит, 2012 .— 771 с.
6	Фистуль В.И. Введение в физику полупроводников / В.И. Фистуль. — М.: Высшая школа, 1984. — 352 с.
7	Орешкин П.Т. Физика полупроводников и диэлектриков / П.Т. Орешкин. — М.: Высшая школа, 1977. — 448 с.
8	Зеегер К. Физика полупроводников / К. Зеегер. — М.: Мир, 1977. — 615 с.
9	Бонч-Бруевич В.Л. Сборник задач по физике полупроводников / В.Л. Бонч-Бруевич, И.П. Звягин, И.В. Карпенко, А.Т. Миронов. — М.: Наука, 1987. — 144 с.
10	Антипов Б.Л. Материалы электронной техники. Задачи и вопросы / Б.Л. Антипов, В.С. Сорокин, В.А. Терехов. — М.: Высшая школа, 1990. — 208 с.
11	Ю П. Основы физики полупроводников / П. Ю, М. Кардона. — М.: Физматлит, 2002. — 560 с.
12	Бонч-Бруевич В.Л., Калашников С.Г. Физика полупроводников/ В.Л. Бонч-Бруевич. — М.: Наука, 1977. — 672 с.
13	Киреев П.С. Физика полупроводников / П.С. Киреев. — М.: Высшая школа, 1975. — 584 с.

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

№ п/п	Источник
14	Портал Электронный университет ВГУ < https://edu.vsu.ru >
15	www.lib.vsu.ru – ЗНБ ВГУ
16	Базы знаний и библиотеки периодических изданий и препринтов в Интернете http://xxx.lanl.gov
17	Электронная библиотека учебно-методических материалов ВГУ http://www.lib.vsu.ru/cgi-bin/zgate?Init+lib.xml.simple.xsl+rus

16. Перечень учебно-методического обеспечения для самостоятельной работы

№ п/п	Источник
1	Статистика электронов и дырок в полупроводниках : учебное пособие по лекционному курсу «Физика полупроводников» / Воронеж. гос. ун-т; сост. : Е.Н. Бормонтов, М.Ю. Хухрянский .— Воронеж : ЛОП ВГУ, 2003 .— 30 с.
2	Моделирование зонной структуры полупроводников : учебное пособие по лекционному курсу «Физика полупроводников» / Воронеж. гос. ун-т; сост. : Е.Н. Бормонтов, Г.В. Быкадорова, А.Е. Гаврилов.— Воронеж : ЛОП ВГУ, 2003 .— 32 с.
3	Кинетические явления в полупроводниках : учебно-методическое пособие для вузов : [для студ. 3 к. днев. отд-ния физ. фак., обуч. по программе подготовки бакалавров ; для направлений: 210100 - Электроника и наноэлектроника, 011800 - Радиофизика (профиль подготовки - Микроэлектроника и полупроводниковые приборы)]. Ч. 1. Внутренний фотоэффект / Воронеж. гос. ун-т ; сост.: Л.Н. Владимирова, Е.Н. Бормонтов, В.И. Петраков .— Воронеж : Издательский дом ВГУ, 2014 .— 17 с.

4	Кинетические явления в полупроводниках : учебно-методическое пособие для вузов : [для студ. 3 к. днев. отд-ния физ. фак., обуч. по программе подготовки бакалавров ; для направлений: 210100 - Электроника и наноэлектроника, 011800 - Радиофизика (профиль подготовки - Микроэлектроника и полупроводниковые приборы)]. Ч. 2. Эффект Холла / Воронеж. гос. ун-т ; сост.: Л.Н. Владимирова, Е.Н. Бормонтов, В.И. Петраков .— Воронеж : Издательский дом ВГУ, 2014 .— 29 с.
5	Определение типа проводимости полупроводника : учебно-методическое пособие для вузов / Воронеж. гос. ун-т; сост.: Л.Н. Владимирова, Е.Н. Бормонтов, В.И. Петраков .— Воронеж : ИПЦ ВГУ, 2009 .— 18 с.
6	Внутренний фотоэффект в полупроводниках : учебно-методическое пособие для вузов / Воронеж. гос. ун-т; сост.: Л.Н. Владимирова, Е.Н. Бормонтов, Е.Н. Берло .— Воронеж : ИПЦ ВГУ, 2009 .— 19 с.
7	Определение удельного сопротивления полупроводников четырехзондовым методом : учебно-методическое пособие для вузов / Воронеж. гос. ун-т; сост.: Л.Н. Владимирова, Е.Н. Бормонтов, В.И. Петраков .— Воронеж : ИПЦ ВГУ, 2009 .— 17 с.
8	Измерение параметров полупроводников с помощью эффекта Холла : методические материалы для выполнения лабораторной работы / Воронеж. гос. ун-т; сост. : Е.Н. Бормонтов, Л.Н. Владимирова, М.А. Гудков .— Воронеж : ИПЦ ВГУ, 2008 .— 24 с.
9	Моделирование поверхностных свойств полупроводников : учебно-методические материалы к лекциям и практическим занятиям по курсу «Физика полупроводников» / Воронеж. гос. ун-т; сост. : Е.Н. Бормонтов, М.Ю. Хухрянский .— Воронеж : ЛОП ВГУ, 2002 .— 22 с.
10	Яковенко Н.В. Самостоятельная работа студентов : методические рекомендации / Н. В. Яковенко, О.Ю. Сушкова .— Воронеж, 2015 .— 22 с.

17. Образовательные технологии, используемые для реализации учебной дисциплины, включая дистанционные образовательные технологии (ДОТ), электронное обучение (ЭО), смешанное обучение:

Реализация дисциплины с применением электронного обучения и дистанционных образовательных технологий осуществляется через образовательный портал "Электронный университет ВГУ", курс «Физика полупроводников»: <https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=4469> (практические занятия), <https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=4455> (лабораторные занятия).

18. Материально-техническое обеспечение дисциплины:

Учебная аудитория для проведения занятий лекционного типа - мультимедийный кабинет кафедры ФППиМЭ: Стационарный мультимедийный проектор AcerX125H – 1 шт., ноутбук emachines e510 – 1 шт. (MicrosoftWindows 7, договор 3010-15/207-19 от 30.04.2019)

Лаборатория спецпрактикумов кафедры ФППиМЭ: Цифровые осциллографы АКИП 4115/4А - 6 шт., функциональные генераторы Rigol DG1022 - 6 шт., лабораторный стенд для исследования полупроводниковых свойств твердых тел - 1 шт., лабораторный стенд для исследования биполярных структур - 1 шт.; лабораторный стенд для исследования униполярных структур - 1 шт.; лабораторный стенд для исследования вольт-фарадных характеристик - 1 шт.; измерители RLC E7-12 - 2 шт., компьютеры PentiumDualCore - 5 шт. (MicrosoftWindows 7, договор 3010-15/207-19 от 30.04.2019)

Аудитория для самостоятельной работы студентов: Сервер на базе 2-х процессоров Xeon E5-2620 v3. – 1 шт., компьютеры HPProDesk 400 G6 SFF – 9 шт., компьютеры PentiumDualCore - 2 шт., подключенные к сети Интернет и с обеспечением доступа к электронной информационно-образовательной среде ВГУ (Microsoft Windows 7, Windows 10 договор 3010-15/207-19 от 30.04.2019)

19. Оценочные средства для проведения текущей и промежуточной аттестаций

Порядок оценки освоения обучающимися учебного материала определяется содержанием следующих разделов дисциплины:

№ п/п	Наименование раздела дисциплины	Компетенция	Индикаторы достижения компетенции	Оценочные средства
1	Введение	ОПК-1	ОПК-1.1	Практич. занятие 1 лаб. работы 1, 2
2	Кинетические явления в полупроводниках	ОПК-1 ОПК-2	ОПК-1.2 ОПК-1.3 ОПК-2.4	Практич. занятия 2-4 лаб. работы 3, 4, 9, 10
3	Генерация и рекомбинация носителей заряда в полупроводниках	ОПК-1 ОПК-2	ОПК-1.2 ОПК-1.3 ОПК-2.4	Практич. занятие 5 лаб. работа 7
4	Диффузия и дрейф неравновесных носителей	ОПК-1 ОПК-2	ОПК-1.2 ОПК-1.3 ОПК-2.4	Практич. занятие 6 лаб. работа 8
5	Контактные явления в полупроводниках	ОПК-2	ОПК-2.4	Практич. занятие 7 Лаб. работы 5, 6
6	Фотоэлектрические явления в полупроводниках	ОПК-2	ОПК-2.4	Практич. занятие 8 лаб. работа 7
7	Поверхностные свойства полупроводников	ОПК-2	ОПК-2.4	Практич. занятие 9 лаб. работа 11
Промежуточная аттестация: форма контроля - экзамен				Комплект КИМ

20 Типовые оценочные средства и методические материалы, определяющие процедуры оценивания

20.1 Текущий контроль успеваемости

Для текущего контроля успеваемости используется устный опрос, отчеты о ходе выполнения контрольных и лабораторных работ. Промежуточная аттестация по дисциплине – экзамен. В приложение к диплому вносится оценка *отлично/хорошо/удовлетворительно*.

Оценка уровня освоения дисциплины «Физика полупроводников» осуществляется по следующим показателям:

- выполнение заданий практических работ;
- качество и своевременность выполнения лабораторных работ;
- полнота ответов на вопросы контрольно-измерительного материала;
- полнота ответов на дополнительные вопросы.

Критерии оценки освоения дисциплины «Физика полупроводников»:

– оценка *«отлично»* выставляется при полном соответствии работы студента всем вышеуказанным показателям. Соответствует высокому (углубленному) уровню

сформированности компетенций: компетенции сформированы полностью, проявляются и используются систематически, в полном объеме. Данный уровень превосходит, по крайней мере, по одному из перечисленных выше показателей повышенный (продвинутый) уровень;

– оценка «хорошо» выставляется в случае, если работа студента при освоении дисциплины не соответствует одному из перечисленных показателей или в случае предоставления отчетов по лабораторным работам позже установленного срока. Соответствует повышенному (продвинутому) уровню сформированности компетенций: компетенции в целом сформированы, но проявляются и используются фрагментарно, не в полном объеме. Данный уровень превосходит, по крайней мере, по одному из перечисленных выше показателей пороговый (базовый) уровень;

– оценка «удовлетворительно» выставляется в случае, если работа студента при освоении дисциплины не соответствует любым двум из перечисленных показателей. Соответствует пороговому (базовому) уровню сформированности компетенций: компетенции сформированы в общих чертах, проявляются и используются ситуативно, частично. Данный уровень обязателен для всех осваивающих основную образовательную программу;

– оценка «неудовлетворительно» выставляется в случае несоответствия работы студента всем показателям, его неорганизованности, безответственности и низкого качества работы при выполнении лабораторных работ, предусмотренных программой дисциплины.

Факт невыполнения требований, предъявляемых к студенту при освоении дисциплины «Физика полупроводников» и отраженных в вышеперечисленных критериях, фиксируется в ведомости оценкой *неудовлетворительно*.

Если студент не осваивает дисциплину в установленном программой объеме и в сроки, определенные графиком учебного процесса, он не допускается к промежуточной аттестации по данному виду учебной работы.

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 решения практических задач	Повышенный уровень	Отлично
Обучающийся владеет понятийным аппаратом данной области науки (теоретическими основами дисциплины), допускает незначительные ошибки при выполнении практических задач	Базовый уровень	Хорошо
Обучающийся владеет частично теоретическими основами дисциплины, фрагментарно способен выполнять практические задания	Пороговый уровень	Удовлетворительно
Ответ на контрольно-измерительный материал не соответствует любым трем (четырем) из перечисленных показателей. Обучающийся демонстрирует отрывочные, фрагментарные знания, допускает грубые ошибки при проектировании практических задач	–	Неудовлетворительно

Перечень вопросов к экзамену (Комплект КИМ):

Контрольно-измерительный материал № 1

1. Неравновесные носители заряда и квазиуровни Ферми. Виды генерации
2. Эффект Ганна

Контрольно-измерительный материал № 2

1. Кинетика релаксации неравновесных носителей в случае монополярной генерации. Максвелловское время релаксации.
2. Контакт металл-полупроводник. Равновесные энергетические диаграммы барьеров Шоттки и Мота.

Контрольно-измерительный материал № 3

1. Кинетика релаксации неравновесных носителей в случае монополярной генерации. Время жизни электронно-дырочных пар.
2. Модель обедненного приконтактного слоя

Контрольно-измерительный материал № 4

1. Виды и механизмы рекомбинации. Центры прилипания и рекомбинации. Демаркационные уровни.
2. Контакт металл-полупроводник при наличии внешнего смещения

Контрольно-измерительный материал № 5

1. Рекомбинация носителей через локальные центры (модель Шокли-Рида-Холла). Время жизни неосновных носителей.
2. ВАХ идеального контакта металл-полупроводник (диодная теория выпрямления).

Контрольно-измерительный материал № 6

1. Уравнение непрерывности
2. Диффузионная теория выпрямления. ВАХ реального контакта Шоттки.

Контрольно-измерительный материал № 7

1. Диффузия и дрейф неравновесных носителей заряда.
2. Эффект Шоттки

Контрольно-измерительный материал № 8

1. Уравнение диффузии
2. Влияние поверхностных состояний на контактные явления. Пиннинг уровня Ферми

Контрольно-измерительный материал № 9

1. Кинетическое уравнение Больцмана
2. Физические свойства и ВАХ $p-n$ -перехода

Контрольно-измерительный материал № 10

1. Решение уравнения Больцмана в приближении времени релаксации
2. Внутренний фотоэффект. Кинетика фотопроводимости в случае линейной и квадратичной рекомбинации.

Контрольно-измерительный материал № 11

1. Электропроводность полупроводников и ее температурная зависимость.
2. Эффект Дембера

Контрольно-измерительный материал № 12

1. Термоэлектрические явления в полупроводниках. Эффект Зеебека.
2. Фотогальванический эффект

Контрольно-измерительный материал № 13

1. Эффект Пельтье
2. Фотоэффект на p - n -переходе

Контрольно-измерительный материал № 14

1. Эффект Томпсона
2. Вентильный фотоэффект на контакте металл-полупроводник

Контрольно-измерительный материал № 15

1. Теплопроводность полупроводников
2. Общая характеристика фотовольтаических эффектов. ФЭМ-эффект

Контрольно-измерительный материал № 16

1. Применение термоэлектрических эффектов. Эффективность термоэлектрического преобразования энергии
2. Понятие идеальной и реальной поверхности. Природа и классификация локализованных состояний, связанных с поверхностью

Контрольно-измерительный материал № 17

1. Гальваномагнитные явления в полупроводниках (общая характеристика)
2. Энергетическая диаграмма, основные параметры и разновидности приповерхностной ОПЗ полупроводника.

Контрольно-измерительный материал № 18

1. Эффект Холла и его применение для определения параметров полупроводника
2. Разновидности приповерхностной ОПЗ полупроводника

Контрольно-измерительный материал № 19

1. Термомагнитные явления в полупроводниках
2. Расчет параметров приповерхностной ОПЗ полупроводника

Контрольно-измерительный материал № 20

1. Кинетические явления в сильных электрических полях. Эффект Ганна
2. Поверхностная проводимость. Эффект поля

Перечень практических занятий

- Практическое занятие 1. Классификация полупроводниковых материалов. Модельные представления о проводимости в полупроводнике.
- Практическое занятие 2. Кинетическое уравнение Больцмана. Электропроводность полупроводников и ее температурная зависимость.
- Практическое занятие 3. Механизмы изменения концентрации свободных носителей в сильных полях. Эффект Ганна. Теплопроводность и термоэлектрические явления в полупроводниках. Коэффициент теплопроводности, обусловленной свободными носителями.
- Практическое занятие 4. Явления Зеебека, Пельтье и Томсона.
- Практическое занятие 5. Неравновесные носители заряда. Уравнение непрерывности. Биполярная и монополярная генерация и рекомбинация.
- Практическое занятие 6. Диффузионный и дрейфовый токи. Подвижность и коэффициент диффузии. Соотношение Эйнштейна. Уравнение диффузии. Диффузия в монополярном полупроводнике. Амбиполярные диффузия и дрейф. Длины диффузии и дрейфа.
- Практическое занятие 7. Равновесные энергетические диаграммы барьеров Шоттки и Мотта. Модель обедненного приконтактного слоя. Контакт металл-полупроводник при наличии внешнего смещения. ВАХ идеального контакта металл-полупроводник (двухзонная теория выпрямления). Диффузионная теория выпрямления.
- Практическое занятие 8. Внутренний фотоэффект. Кинетика фотопроводимости. Фотовольтаические эффекты: эффект Дембера, фотогальванический эффект (вентильный эффект на контакте Шоттки и $p-n$ -переходе), ФЭМ-эффект.
- Практическое занятие 9. Понятие идеальной и реальной поверхности. Природа и классификация локализованных состояний, связанных с поверхностью. Приповерхностная область пространственного заряда (ОПЗ). Энергетическая диаграмма, основные параметры и разновидности приповерхностной ОПЗ полупроводника. Расчет параметров ОПЗ. Поверхностная проводимость и эффект поля.

Перечень лабораторных работ:

- Лабораторная работа №1. Моделирование зонной структуры полупроводников
- Лабораторная работа №2. Моделирование статистических свойств электронов и дырок в полупроводниках
- Лабораторная работа №3. Определение типа проводимости полупроводника
- Лабораторная работа №4. Определение удельного сопротивления полупроводников четырёхзондовым методом.
- Лабораторная работа №5. Изучение выпрямляющих свойств контакта Шоттки.
- Лабораторная работа №6. Изучение выпрямляющих свойств электронно-дырочного перехода
- Лабораторная работа №7. Внутренний фотоэффект в полупроводниках
- Лабораторная работа №8. Измерение параметров полупроводников с помощью эффекта Холла
- Лабораторная работа №9. Изучение эффекта Зеебека в полупроводниках.
- Лабораторная работа №10. Изучение эффекта Пельтье в полупроводниках
- Лабораторная работа №11. Моделирование поверхностных свойств полупроводников

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 формах: *устного опроса (индивидуальный опрос); выполнение 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, позволяющие оценить степень сформированности умений, навыков, и опыт деятельности в условиях производства изделий электронной техники.

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