

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



УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой  
физики полупроводников и микроэлектроники

*Е.Н.Бормонтов* (Е.Н.Бормонтов)

01.06.2023

## РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Б1.О.23 Физика МДП-систем

**1. Код и наименование направления подготовки/специальности:**

11.03.04 Электроника и наноэлектроника

**2. Профиль подготовки/специализация:** Интегральная электроника и наноэлектроника

**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 25.05.2023, протокол № 5

---

**8. Учебный год:** 2026-2027

**Семестр(ы):** 8

## 9. Цели и задачи учебной дисциплины:

Целями освоения учебной дисциплины являются: подготовка обучающихся к самостоятельной работе по получению новых знаний в области физических основ МДП электроники, необходимых для успешного использования достижений современной МДП технологии в практической деятельности..

Задачи учебной дисциплины:

- получение представлений о физических идеях и принципах современной МДП электроники;
- формирование комплекса теоретических знаний о физических свойствах МДП-структур, важнейших физических процессах и явлениях, составляющих теоретическую основу МДП-электроники (феноменологическая теория поверхности и приповерхностной ОПЗ полупроводников; физические основы теории МДП-структур);
- познакомить обучающихся с методами исследования электрофизических характеристик МДП- структур;
- изучить механизмы нестабильности МДП-структур и методы их исследования;
- формирование представлений о квантовых свойствах МДП-структур;
- познакомить обучающихся с применением МДП-структур и приборов КМОП-технологии в современной микро- и нанoeлектронике и перспективами развития МДП-электроники.

## 10. Место учебной дисциплины в структуре ОПОП:

Для ее усвоения требуются знания, формируемые при освоении общепрофессиональных и профессиональных дисциплин: «Физические основы электроники», «Физика полупроводников», «Методы исследования и контроля полупроводников»/« Методы анализа полупроводниковых структур».

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 при выполнении преддипломной практики, написания выпускной квалификационной работы в области микро- и нанoeлектроники.

## 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-1.2	Применяет физические законы и математические методы для решения задач теоретического и прикладного характера	<b>Знать:</b> - существующие теории различных физических явлений и процессов, происходящих в МДП-структурах <b>Уметь:</b> - применять физические законы и математические методы для решения задач теоретического и прикладного характера в физике МДП-структур

		ОПК-1.3	Использует положения, законы и методы естественных наук для решения инженерных задач в сфере профессиональной деятельности	<b>Знать:</b> - основные представления о физических идеях и принципах современной физики МДП-структур <b>Уметь:</b> - использовать полученные теоретические знания и умения для решения конкретных инженерных и прикладных задач физики МДП-структур
--	--	---------	--	---

**12. Объем дисциплины в зачетных единицах/час. — 6 / 216.**

**Форма промежуточной аттестации: экзамен**

**13. Виды учебной работы**

Вид учебной работы		Трудоемкость	
		Всего	По семестрам
			8 семестр
Аудиторные занятия		84	84
в том числе:	лекции	36	38
	практические	-	-
	лабораторные	48	48
Самостоятельная работа		96	96
Форма промежуточной аттестации - экзамен		36	36
Итого:		216	216

**13.1. Содержание дисциплины**

п/п	Наименование раздела дисциплины	Содержание раздела дисциплины	Реализация раздела дисциплины с помощью онлайн-курса, ЭУМК *
<b>1. Лекции</b>			
1.1	Введение. МДП-электроника – основа современных информационных систем	Роль структур типа МДП в современной микроэлектронике. Характерные размеры и требования к материалам, используемым в МДП-структурах. Перспективы развития МДП-технологии. Предмет и содержание курса.	-
1.2	Феноменологическая теория поверхности и приповерхностной ОПЗ полупроводников	Природа поверхности полупроводников. Поверхностные электронные состояния и их классификация. Область пространственного заряда (ОПЗ) вблизи поверхности. Разновидности ОПЗ и концентрация носителей заряда. Теория приповерхностной ОПЗ полупроводника. Заряд в поверхностных со-	-

		стояниях (ПС). Дифференциальная емкость, обусловленная перезарядкой ПС	
1.3	Физические основы теории МДП-структур	Теория идеальной МДП-структуры. Зонные диаграммы, зависимость поверхностного потенциала от напряжения на затворе, вольт-фарадные характеристики (ВФХ) на низкой частоте (НЧ) и высокой частоте (ВЧ). Реальные структуры. Заряды в окисле кремниевых МОП-структур. Влияние контактной разности потенциалов и других внешних факторов на напряжение плоских зон и ВФХ МДП-структуры. Эквивалентные схемы МДП-структур. Неравновесные процессы. Неравновесное обеднение в МДП структурах. Механизмы релаксации инверсионного слоя. Нарушение равновесия при протекании тока. Механизмы токопрохождения в диэлектрических пленках МДП-структур	-
1.4	Методы исследования электрофизических характеристик МДП-структур	Определение электрофизических параметров МДП-структуры методом ВЧ ВФХ. Определение типа проводимости, уровня и профиля легирования полупроводника, напряжения плоских зон и порогового напряжения, эффективного поверхностного заряда. Определение зависимости поверхностного потенциала от управляющего напряжения (калибровка ВФХ по поверхностному потенциалу). Методы определения энергетического распределения ПС. Автоматизация измерений. Определение темпа генерации, времени жизни, времени релаксации инверсионного слоя и скорости поверхностной рекомбинации методом Цербста. Другие методы определения генерационно-рекомбинационных характеристик МДП-структуры	<p>Определение электрофизических параметров МДП-структуры вальт-фарадными методами  <a href="https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=4444#section-1">https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=4444#section-1</a></p> <p>Определение профиля легирующей примеси в ПП. Анализ неравновесных процессов  <a href="https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=4444#section-2">https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=4444#section-2</a></p> <p>Определение генерационно-рекомбинационных характеристик МДП-структуры  <a href="https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=4444#section-3">https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=4444#section-3</a></p>

1.5	Механизмы неустойчивости МДП-структур	Общая характеристика процессов неустойчивости МДП-систем. Миграция ионов в диэлектрической пленке. Электронный захват на ПС и объемные ловушки в диэлектрике. Дипольная поляризация диэлектрика. Способы стабилизации свойств МДП-структур. Методы исследования неустойчивости. Метод смещения ВФХ после термической обработки структуры. Метод динамических вольт-амперных характеристик (ДВАХ). Метод термостимулированной поляризации (ТСП) и его модификации	Механизмы неустойчивости реальных МДП-систем <a href="https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=4444#section-3">https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=4444#section-3</a>
1.6	Теория адмиттанса МДП-структур	Теория адмиттанса МДП-структуры. Адмиттанс моно-уровня и континуума ПС в идеализированной МДП-структуре. Туннельная модель адмиттанса при захвате носителей заряда на ловушки в диэлектрике. Флуктуационная модель адмиттанса в структурах, микронеоднородных по поверхностному потенциалу. Туннельно-флуктуационная модель адмиттанса. Случаи равномерного и экспоненциального распределения ловушек в подзатворном диэлектрике. Определение параметров ПС методом адмиттанса.	-
1.7	Квантовые свойства МДП-структур	Квантово-механическая модель приповерхностной ОПЗ полупроводника. Электрическое квантование. Критерии образования двумерного (2D) электронного газа. Методы расчета энергетического спектра двумерных носителей. Электрический квантовый предел. Плотность квантовых состояний и концентрация 2D- электронного газа. Свойства 2D- электронного газа в магнитном поле. Энергетический спектр и плотность состояний в идеальной системе. Учет разупорядоченности реальной структуры. Локализация электронных состояний в 2D-системе со случайным потенциалом. Перколяционная модель проводимости. Квантовый эффект Холла. Суть явления и основные эксперименты. Условия наблюдения и методика измерений. Качественная физическая интерпретация. Метрологические применения КЭХ. Квантовая метрология и фундаментальные физические константы.	-
1.8	МДП-транзисторы и приборы КМОП-технологии	Физика работы МОП-транзистора (МОПТ) и КМОП-технология. ВАХ МОПТ. Физические и технологические процессы, влияющие на характеристики МОПТ. Эффекты сильных электрических полей. МОПТ с коротким каналом. Эффекты короткого канала. Пути повышения быстродействия МОПТ. Особенности приборов КМОП-технологии. Цифровая техника и логические вентили. Интегральные схемы КМОП-технологии	МОП-транзисторы <a href="https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=4444#section-4">https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=4444#section-4</a>
1.9	Применение МДП-структур	Энергонезависимые элементы памяти. Приборы с плавающим затвором и устрой-	

		ства со структурой МДОП и их применение. Приборы с зарядовой связью (ПЗС). Основные параметры и режимы работы. Области применения ПЗС. Фотозлектрические МДП-приборы. Перспективы развития МДП-электроники	-
<b>2. Лабораторные работы</b>			
2.1	Физические основы теории МДП-структур	Лабораторная работа 1. Определение электрофизических параметров МДП-структур методом равновесных ВЧ ВАХ. Лабораторная работа 2. Изучение поверхностных состояний методом полной проводимости	МДП-структуры и их роль в мэ <a href="https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=4464#section-1">https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=4464#section-1</a>  Идеальная и реальная МДП-структура <a href="https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=4464#section-2">https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=4464#section-2</a>
2.2	Методы исследования электрофизических характеристик МДП-структур	Лабораторная работа 3. Определение профиля легирования полупроводника методом неравновесных вольт-фарадных характеристик Лабораторная работа 4. Определение генерационно-рекомбинационных характеристик МДП-структур	Типичный вид C-V характеристик МДП-структур <a href="https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=4464#section-3">https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=4464#section-3</a>  Обработка равновесных ВЧ ВФХ МДП-структур <a href="https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=4464#section-4">https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=4464#section-4</a>
2.3	МДП-транзисторы и приборы КМОП-технологии	Лабораторная работа 5. Моделирование радиационных эффектов в структурах металл-диэлектрик-полупроводник Лабораторная работа 6. Автоматизированный контроль электрофизических параметров МДП-структур	Влияние зарядов в окисле и контактной разности потенциалов металл-пп в реальных МДП-структурах <a href="https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=4464#section-5">https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=4464#section-5</a>

### 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. МДП-электроника – основа современных информационных систем	2	-	-	8	10
2	Феноменологическая теория поверхности и приповерхностной ОПЗ полупроводников	6	-	-	10	16
3	Физические основы теории МДП-структур	8	-	16	16	40
4	Методы исследования электрофизических характеристик МДП-структур	8	-	20	16	44
5	Механизмы неустойчивости МДП-структур	4	-	-	8	12
6	Теория адмиттанса МДП-структур	2	-	-	10	12
7	Квантовые свойства МДП-структур	2	-	-	8	10
8	МДП-транзисторы и приборы КМОП-технологии	2	-	12	12	26
9	Применение МДП-структур	2	-	-	8	10
	Экзамен – 36 часов					36
	Итого:	36	-	48	96	216

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

Необходимо пользоваться возможностью интерактивного проведения лекций, задавать вопросы, высказываться по проблематике материала. На практических занятиях выполнение учебных заданий осуществляется в аудитории и дома. Обязательно посещение текущих аттестаций.

Изучение дисциплины «Физика МДП-систем» 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, выяснены 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, необхо-



димых 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 МДП-систем» включает в себя: подготовку и участие в изучении теоретической части курса, подготовку к выполнению лабораторных работ, подготовку к экзамену.

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

а) основная литература:

№ п/п	Источник
1	Гуртов В.А. Физика твердого тела для инженеров / В.А. Гуртов, Р.Н. Осауленко .— 2-е изд., испр. и доп. — Москва : Техносфера, 2012 .— 560 с.— <URL: <a href="http://biblioclub.lib.vsu.ru/index.php?page=book_red&amp;id=233466&amp;sr=1">http://biblioclub.lib.vsu.ru/index.php?page=book_red&amp;id=233466&amp;sr=1</a> >.
2	Федоров С.В. Электроника : учебник / С.В. Федоров, А.В. Бондарев .— Оренбург : ОГУ, 2015.—218с. — <URL: <a href="http://biblioclub.lib.vsu.ru/index.php?page=book_red&amp;id=438991&amp;sr=1">http://biblioclub.lib.vsu.ru/index.php?page=book_red&amp;id=438991&amp;sr=1</a> >.

б) дополнительная литература:

№ п/п	Источник
3	Гуртов В. А. 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.
4	Красников Г.Я. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов / Г. Красников .— изд. 2-е, испр. — Москва : Техносфера, 2011 .— 799 с.
5	Овсюк В.Н. Электронные процессы в полупроводниках с областями пространственного заряда / В.Н. Овсюк ; АН СССР, Институт физики полупроводников; Отв. ред. А.В. Ржанов .— Новосибирск : Наука, 1984 .— 252 с.
6	Литовченко В.Г. Основы физики микроэлектронных систем металл - диэлектрик - полупроводник / В.Г. Литовченко, А.П. Горбань ; АН УССР. Институт полупроводников ; [отв. ред. В.Л. Винецкий] .— Киев : Наукова думка, 1978 .— 312 с.
7	Квантовый эффект Холла / Кейдж М., Чэнг А., Гирвин С. и др. ; под ред. Р. Пренджа, С. Гирвина; пер. с англ. под ред. Г. Е. Пикуса .— М. : Мир, 1989 .— 404 с.
8	Сыновров В.Ф. Физика МДП-структур : Учеб.пособие .— Воронеж : Изд-во Воронеж. ун-та, 1989 .— 224 с.
9	Зи С. Физика полупроводниковых приборов : в 2 кн. / С. Зи ; пер. с англ. под ред. Р.А. Суриса .— М. : Мир, 1984.

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

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

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

№ п/п	Источник
1	Бормонтов, Е.Н. Физика и метрология МДП-структур : Рекомендовано учеб.-метод. объединением по образованию в области автоматике, электроники, микроэлектроники и радиотехники в качестве учеб. пособия для студентов вузов, обучающихся по специальностям 200.100 "Физика и технология материалов и компонентов электронной техники" и 200.200 "Микроэлектроника и полупроводниковые приборы" .— Воронеж : Изд-во Воронеж. ун-та, 1997 .— 184с.
2	Основные механизмы переноса носителей заряда в пленочных структурах металл-диэлектрик-металл и металл-диэлектрик-полупроводник : учебно-методическое пособие для вузов / Воронеж. гос. ун-т ; сост.: Е.А. Тутов, Е.Н. Бормонтов, Т.Г. Меньшикова .— Воронеж : ИПЦ ВГУ, 2007 .— 24 с.
3	Бормонтов Е.Н. Электрофизические методы исследования МДП-структур. Ч. 1 : учебное пособие по лекционному курсу «Физика и метрология МДП-структур» / Е.Н. Бормонтов. – Воронеж : ЛОП ВГУ, 2003. – 42 с.
4	Бормонтов Е.Н. Электрофизические методы исследования МДП-структур. Ч. 2 : учебное пособие по лекционному курсу «Физика и метрология МДП-структур» / Е.Н. Бормонтов. – Воронеж : ЛОП ВГУ, 2003. – 42 с.
5	Приборно-технологическое проектирование компонентной базы микро- и нанозлектроники : учебно-методическое пособие : [для слушателей Президентской программы повышения квалификации инженер. кадров "Приборно-технологическое проектирование компонентной базы микро- и нанозлектроники" по направлению "Электронная техника, радиотехника и связь", а также для студ. 1 и 2 к. очной формы обучения физ. фак., обуч. по программе магистратуры; для направления 11.04.04 - Электроника и нанозлектроника с профилями, Интегральная электроника и нанозлектроника, Нанозлектроника] / Воронеж. гос. ун-т ; [сост. : Г.В. Быкадорова и др.] .— Воронеж : Издательский дом ВГУ, 2016 .— 119 с.
6	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 МДП-систем»: <https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=4444> (лекции) <https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=4464> (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. МДП-электроника – основа современных информационных систем	ОПК-1	ОПК-1.2	лаб.работы 1, 2
2	Феноменологическая теория поверхности и приповерхностной ОПЗ полупроводников	ОПК-1	ОПК-1.2 ОПК-1.3	лаб.работы 1, 2
3	Физические основы теории МДП-структур	ОПК-1	ОПК-1.3	лаб.работы 2, 5
4	Методы исследования электрофизических характеристик МДП-структур	ОПК-1	ОПК-1.2 ОПК-1.3	лаб.работы 1, 3, 6
5	Механизмы неустойчивости МДП-структур	ОПК-1	ОПК-1.2 ОПК-1.3	Лаб.работы 4, 6
6	Теория адмиттанса МДП-структур	ОПК-1	ОПК-1.2	Лаб.работы 3, 4, 6
7	Квантовые свойства МДП-структур	ОПК-1	ОПК-1.2	Лаб.работы 2, 5
8	МДП-транзисторы и приборы КМОП-технологии	ОПК-1	ОПК-1.3	Лаб.работы 4, 5
9	Применение МДП-структур	ОПК-1	ОПК-1.2 ОПК-1.3	Лаб.работы 3, 5
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 лабораторных работ. Промежуточная аттестация по дисциплине – экзамен. В приложение к диплому вносится оценка *отлично/хорошо/удовлетворительно*. Оценка уровня освоения дисциплины «Физика МДП-систем» осуществляется по следующим показателям:

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

Критерии оценки освоения дисциплины «Физика МДП-систем»:

– 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 представления междисциплинарного проекта 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 МДП-систем» 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 практиче-	Пороговый уровень	Удовлетворительно

ские задания		
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. Роль структур типа МДП в современной микроэлектронике. Характерные размеры и требования к материалам, используемым в МДП-структурах. Перспективы развития МДП-технологии.
2. Туннельная модель адмиттанса при захвате носителей заряда на ловушки в диэлектрике.

#### Контрольно-измерительный материал № 2

1. Природа поверхности полупроводников. Поверхностные электронные состояния и их классификация. Область пространственного заряда (ОПЗ) вблизи поверхности. Разновидности ОПЗ и концентрация носителей заряда.
2. Флуктуационная модель адмиттанса в структурах, микронеоднородных по поверхностному потенциалу.

#### Контрольно-измерительный материал № 3

1. Теория приповерхностной ОПЗ полупроводника. Заряд в поверхностных состояниях (ПС). Дифференциальная емкость, обусловленная перезарядкой ПС.
2. Туннельно-флуктуационная модель адмиттанса.

#### Контрольно-измерительный материал № 4

1. Теория идеальной МДП-структуры. Зонные диаграммы, зависимость поверхностного потенциала от напряжения на затворе, вольт-фарадные характеристики (ВФХ) на низкой частоте (НЧ) и высокой частоте (ВЧ).
2. Случаи равномерного и экспоненциального распределения ловушек в подзатворном диэлектрике. Определение параметров ПС методом адмиттанса.

#### Контрольно-измерительный материал № 5

1. Реальные структуры. Заряды в окисле кремниевых МОП-структур. Влияние контактной разности потенциалов и других внешних факторов на напряжение плоских зон и ВФХ МДП-структуры
2. Квантово-механическая модель приповерхностной ОПЗ полупроводника. Электрическое квантование. Критерии образования двумерного (2D) электронного газа.

#### Контрольно-измерительный материал № 6

1. Эквивалентные схемы МДП-структур. Неравновесные процессы. Неравновесное обеднение в МДП-структурах. Механизмы релаксации инверсионного слоя. Нарушение равновесия при протекании тока. Механизмы токопрохождения в диэлектрических пленках МДП-структур.
2. Методы расчета энергетического спектра двумерных носителей. Электрический квантовый предел. Плотность квантовых состояний и концентрация 2D- электронного газа. Свойства 2D- электронного газа в магнитном поле.

### **Контрольно-измерительный материал № 7**

1. Определение электрофизических параметров МДП-структуры методом ВЧ ВФХ. Определение типа проводимости, уровня и профиля легирования полупроводника, напряжения плоских зон и порогового напряжения, эффективного поверхностного заряда.
2. Энергетический спектр и плотность состояний в идеальной системе. Учет разупорядоченности реальной структуры. Локализация электронных состояний в 2D- системе со случайным потенциалом. Перколяционная модель проводимости.

### **Контрольно-измерительный материал № 8**

1. Определение зависимости поверхностного потенциала от управляющего напряжения (калибровка ВФХ по поверхностному потенциалу). Методы определения энергетического распределения ПС.
2. Квантовый эффект Холла. Суть явления и основные эксперименты. Условия наблюдения и методика измерений. Качественная физическая интерпретация. Метрологические применения КЭХ. Квантовая метрология и фундаментальные физические константы.

### **Контрольно-измерительный материал № 9**

1. Автоматизация измерений. Определение темпа генерации, времени жизни, времени релаксации инверсионного слоя и скорости поверхностной рекомбинации методом Цербста. Другие методы определения генерационно-рекомбинационных характеристик МДП-структуры.
2. Физика работы МОП-транзистора (МОПТ) и КМОП-технология. ВАХ МОПТ. Физические и технологические процессы, влияющие на характеристики МОПТ. Эффекты сильных электрических полей. МОПТ с коротким каналом. Эффекты короткого канала. Пути повышения быстродействия МОПТ. Особенности приборов КМОП-технологии.

### **Контрольно-измерительный материал № 10**

1. Общая характеристика процессов нестабильности МДП-систем. Миграция ионов в диэлектрической пленке. Электронный захват на ПС и объемные ловушки в диэлектрике.
2. Цифровая техника и логические вентили. Интегральные схемы КМОП-технологии.

### **Контрольно-измерительный материал № 11**

1. Дипольная поляризация диэлектрика. Способы стабилизации свойств МДП-структур. Методы исследования нестабильности. Метод смещения ВФХ после термополевой обработки структуры.
2. Энергонезависимые элементы памяти.

### **Контрольно-измерительный материал № 12**

1. Метод динамических вольт-амперных характеристик (ДВАХ).
2. Приборы с зарядовой связью (ПЗС). Основные параметры и режимы работы. Области применения ПЗС.

### **Контрольно-измерительный материал № 13**

1. Метод термостимулированной поляризации (ТСП) и его модификации.
2. Эффект «всплеска» дрейфовой скорости. Баллистический транспорт.

### **Контрольно-измерительный материал № 14**

1. Теория адмиттанса МДП-структуры. Адмиттанс моно-уровня и континуума ПС в идеализированной МДП-структуре.
2. Фотоэлектрические МДП-приборы.

#### **Перечень лабораторных работ:**

Лабораторная работа 1. Определение электрофизических параметров МДП-структур методом равновесных ВЧ ВАХ.

Лабораторная работа 2. Изучение поверхностных состояний методом полной проводимости.

Лабораторная работа 3. Определение профиля легирования полупроводника методом неравновесных вольт-фарадных характеристик.

Лабораторная работа 4. Определение генерационно-рекомбинационных характеристик МДП-структур.

Лабораторная работа 5. Моделирование радиационных эффектов в структурах металл-диэлектрик-полупроводник.

Лабораторная работа 6. Автоматизированный контроль электрофизических параметров МДП-структур.

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.