

Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Направление подготовки/специальность: 11.03.04 Электроника и нанoeлектроника

Наименование образовательной программы: Микроэлектроника и твердотельная электроника

Уровень образования: высшее образование - бакалавриат

Форма обучения: Очная

Рабочая программа дисциплины
ФИЗИКА МДП-СТРУКТУР

| | |
|--|---|
| Блок: | Блок 1 «Дисциплины (модули)» |
| Часть образовательной программы: | Часть, формируемая участниками образовательных отношений |
| № дисциплины по учебному плану: | Б1.Ч.01.11 |
| Трудоемкость в зачетных единицах: | 7 семестр - 5; |
| Часов (всего) по учебному плану: | 180 часов |
| Лекции | 7 семестр - 32 часа; |
| Практические занятия | 7 семестр - 48 часа; |
| Лабораторные работы | не предусмотрено учебным планом |
| Консультации | 7 семестр - 2 часа; |
| Самостоятельная работа | 7 семестр - 97,5 часа; |
| в том числе на КП/КР | не предусмотрено учебным планом |
| Иная контактная работа | проводится в рамках часов аудиторных занятий |
| включая: Контрольная работа Расчетно-графическая работа | |
| Промежуточная аттестация: | |
| Экзамен | 7 семестр - 0,5 часа; |

Москва 2024

ПРОГРАММУ СОСТАВИЛ:

Преподаватель

| | | |
|--|---|----------------------------|
| | Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» | |
| | Сведения о владельце ЦЭП МЭИ | |
| | Владелец | Зезин Д.А. |
| | Идентификатор | Re7522a00-ZezinDA-ba8dbd73 |

Д.А. Зезин

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель
образовательной программы

| | | |
|--|---|------------------------------|
| | Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» | |
| | Сведения о владельце ЦЭП МЭИ | |
| | Владелец | Баринов А.Д. |
| | Идентификатор | Ra98e1318-BarinovAD-f138ec4f |

А.Д. Баринов

Заведующий выпускающей
кафедрой

| | | |
|--|---|----------------------------|
| | Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» | |
| | Сведения о владельце ЦЭП МЭИ | |
| | Владелец | Зезин Д.А. |
| | Идентификатор | Re7522a00-ZezinDA-ba8dbd73 |

Д.А. Зезин

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Цель освоения дисциплины: Углублённое изучение физических основ и принципов работы полевых полупроводниковых приборов и компонентов интегральных схем, основных параметров и характеристик, области применения

Задачи дисциплины

- развитие способности учитывать физические основы работы полевых полупроводниковых приборов и интегральных схем, применяемых в приборах и устройствах электроники и нанoeлектроники;
- освоение способности строить простейшие физические и математические модели полевых полупроводниковых приборов и интегральных схем, а также использовать стандартные программные средства их компьютерного моделирования;;
- развитие способности аргументированно выбирать и реализовывать на практике эффективную методику экспериментального исследования параметров и характеристик полупроводниковых приборов и интегральных схем;;
- развитие готовности анализировать и систематизировать результаты исследований, представлять материалы в виде научных отчётов.

Формируемые у обучающегося **компетенции** и запланированные **результаты обучения** по дисциплине, соотнесенные с **индикаторами достижения компетенций**:

| Код и наименование компетенции | Код и наименование индикатора достижения компетенции | Запланированные результаты обучения |
|---|---|--|
| ПК-2 Способен осуществлять расчет и проектирование полупроводниковых приборов и устройств, проводить моделирование и анализ с использованием средств автоматизации проектирования | ИД-1ПК-2 Демонстрирует знание принципов работы, физических и математических моделей основных полупроводниковых приборов | знать: - основные физические процессы, определяющие параметры и математические модели полевых транзисторов; - методы оптимизации параметров полупроводниковых полевых транзисторов. уметь: - создавать модели полевых полупроводниковых приборов; - оценивать параметры моделей полупроводниковых приборов. |

2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ ВО

Дисциплина относится к основной профессиональной образовательной программе Микрoeлектроника и твердотельная электроника (далее – ОПОП), направления подготовки 11.03.04 Электроника и нанoeлектроника, уровень образования: высшее образование - бакалавриат.

Базируется на уровне среднего общего образования.

Результаты обучения, полученные при освоении дисциплины, необходимы при выполнении выпускной квалификационной работы.

3. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

3.1 Структура дисциплины

Общая трудоемкость дисциплины составляет 5 зачетных единиц, 180 часов.

| № п/п | Разделы/темы дисциплины/формы промежуточной аттестации | Всего часов на раздел | Семестр | Распределение трудоемкости раздела (в часах) по видам учебной работы | | | | | | | | | | Содержание самостоятельной работы/ методические указания | |
|-------|---|-----------------------|---------|--|-----|----|--------------|---|-----|----|----|-------------------|--|---|--|
| | | | | Контактная работа | | | | | | | СР | | | | |
| | | | | Лек | Лаб | Пр | Консультация | | ИКР | | ПА | Работа в семестре | Подготовка к аттестации /контроль | | |
| КПР | ГК | ИККП | ТК | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | |
| 1 | Основные понятия. | 12 | 7 | 4 | - | 4 | - | - | - | - | - | 4 | - | <u>Подготовка к аудиторным занятиям:</u> [1] с. 45-132 <u>Изучение материалов литературных источников:</u> [2], с. 45-132 | |
| 1.1 | Основные понятия. | 12 | | 4 | - | 4 | - | - | - | - | - | 4 | - | | |
| 2 | Простейшие полевые приборы | 12 | | 4 | - | 4 | - | - | - | - | - | 4 | - | | <u>Подготовка к аудиторным занятиям:</u> [1] с. 254-300 <u>Изучение материалов литературных источников:</u> [2], с. 254-300 [4], с. 25–36 |
| 2.1 | Простейшие полевые приборы | 12 | | 4 | - | 4 | - | - | - | - | - | 4 | - | | |
| 3 | Модели полевых ИС | 50 | | 10 | - | 16 | - | - | - | - | - | 24 | - | | <u>Подготовка к аудиторным занятиям:</u> [1] с. 133-190, 410-428 [2] с. с. 25–36 <u>Изучение материалов литературных источников:</u> [2], с. 133-190, 410-428 [3], с. 25–36 |
| 3.1 | Модели полевых ИС | 50 | | 10 | - | 16 | - | - | - | - | - | 24 | - | | |
| 4 | ИС на основе полевых транзисторов | 50 | | 10 | - | 16 | - | - | - | - | - | 24 | - | | <u>Подготовка к аудиторным занятиям:</u> [1], с. 133-190, 410-428 <u>Изучение материалов литературных источников:</u> [2], с. 133-190, 410-428 |
| 4.1 | ИС на основе полевых транзисторов | 50 | 10 | - | 16 | - | - | - | - | - | 24 | - | | | |
| 5 | Транзисторы на основе широкозонных полупроводников и гетеропереходов. Особенности функционально | 20 | 4 | - | 8 | - | - | - | - | - | 8 | - | <u>Подготовка к аудиторным занятиям:</u> [3], с. 223–233 <u>Изучение материалов литературных источников:</u> [1], с. 223–233 | | |

| | | | | | | | | | | | | | |
|-----|--|-------|----|---|----|---|---|---|---|-----|----|------|--|
| | ориентированных ИС | | | | | | | | | | | | |
| 5.1 | Транзисторы на основе широкозонных полупроводников и гетеропереходов. Особенности функционально ориентированных ИС | 20 | 4 | - | 8 | - | - | - | - | - | 8 | - | |
| | Экзамен | 36.0 | - | - | - | - | 2 | - | - | 0.5 | - | 33.5 | |
| | Всего за семестр | 180.0 | 32 | - | 48 | - | 2 | - | - | 0.5 | 64 | 33.5 | |
| | Итого за семестр | 180.0 | 32 | - | 48 | | 2 | | - | 0.5 | | 97.5 | |

Примечание: Лек – лекции; Лаб – лабораторные работы; Пр – практические занятия; КПр – аудиторные консультации по курсовым проектам/работам; ИККП – индивидуальные консультации по курсовым проектам/работам; ГК- групповые консультации по разделам дисциплины; СР – самостоятельная работа студента; ИКР – иная контактная работа; ТК – текущий контроль; ПА – промежуточная аттестация

3.2 Краткое содержание разделов

1. Основные понятия.

1.1. Основные понятия.

Суть полупроводниковой электроники – управление сопротивлением слоёв полупроводниковых структур. Два способа управления – токовый и полевой и типы приборов, реализующие эти два способа. Характерные длины и времена в физике полупроводников и полупроводниковых приборов. Понятие о квазинейтральности. Условие возникновения рп-перехода и его свойства (потенциальный барьер, электрическое поле рп-перехода, ёмкость рп-перехода, ВАХ рп-перехода). Генерация и рекомбинация в области пространственного заряда рп-перехода. Зонная диаграмма контакта металл-полупроводник. Выпрямительные свойства контакта металл-полупроводник. Силы изображения и эффект Шоттки. Статическая ВАХ диода Шоттки. Омические контакты. Структура омических контактов и их особенности..

2. Простейшие полевые приборы

2.1. Простейшие полевые приборы

Полевые транзисторы с управляющим р-п переходом (JFET). СИТ - транзисторы. Полевые транзисторы с управляющим барьером Шоттки (MESFET). Полевые транзисторы с управляющей МОП структурой (MOSFET). Биполярные транзисторы, управляемые с помощью МОП структур (IGBT). Тепловые свойства полупроводниковых приборов. Понятие об области безопасной работы полупроводниковых приборов..

3. Модели полевых ИС

3.1. Модели полевых ИС

Элементы ИС, структурные и топологические варианты реализации элементов. Физические процессы в транзисторных структурах. Электрические модели биполярного транзистора. Физические процессы, конструкции и модели. Паразитные явления в пассивных элементах ИС. Модели элементов и представления о методах идентификации параметров..

4. ИС на основе полевых транзисторов

4.1. ИС на основе полевых транзисторов

ИС на основе полевых транзисторов с управляющим р-п переходом. Модель полевого транзистора с произвольным профилем легирования канала. Элементы ИС с МОП - структурой. Полевые транзисторы для МОП ИС. Модель МДП транзистора. Подпороговые характеристики МДП транзисторов. Эффекты сильного поля в канале МДП транзисторов. Короткоканальные эффекты в МДП транзисторах. Подпороговые токи, эффект модуляции барьера истока стоковым напряжением, изменение порогового напряжения. Умножение носителей и зарядка окисла в МДП транзисторах. Инжекционный пробой. Эффект «защёлки» (тиристорный эффект) в КМОП ИС, методы его подавления. Масштабная миниатюризация в МДП ИС и её пределы. Эффекты горячих носителей в короткоканальных МДП приборах и методы подавления этих эффектов..

5. Транзисторы на основе широкозонных полупроводников и гетеропереходов. Особенности функционально ориентированных ИС

5.1. Транзисторы на основе широкозонных полупроводников и гетеропереходов.
Особенности функционально ориентированных ИС

Биполярные интегральные схемы на основе гетеропереходов. Особенности ИС на основе GaAs. Барьер Шоттки. Инжекция неосновных носителей. Полевые транзисторы с гетеропереходами. Основные типы конструкций. Нелинейные резисторы в ИС на основе GaAs. Особенности полевых транзисторов на основе широкозонных полупроводников (GaAs, SiC, AlGaN) по сравнению с транзисторами на основе кремния (Si). Модель двух областей, модель с полностью насыщенной скоростью. Полевые транзисторы с высокой подвижностью электронов Приборы с зарядовой связью, физические основы работы. Основные характеристики, верхняя и нижняя рабочие частоты, эффективность переноса. Физика элементов статической памяти на основе структур металл-диэлектрик-(диэлектрик)-полупроводник. Элементы памяти с лавинной инжекцией заряда. Элементы памяти с двухслойным диэлектриком. Проблемы элементной базы аналоговых ИС, интегральных схем ЦАП-АЦП. Методы экспериментального исследования элементов ИС на стадии разработки и производства. Принципы и приёмы разработки тестовых структур элементов, узлов и микросистем. Представления об автоматизированных системах экспериментальных исследований элементов тестовых структур..

3.3. Темы практических занятий

1. 13. Приборы с зарядовой связью. Элементы статической памяти на основе структур металл-диэлектрик1- диэлектрик2-полупроводник.;
2. 12. Полевые транзисторы с управляющим рп-переходом (JFET);;
3. 11. Полевые транзисторы с гетеропереходами;;
4. 10. Частотные свойства транзистора;;
5. 9. Тиристоры;;
6. 8. Контакты металл-полупроводник;;
7. 7. МДП-транзисторы; расчёт выходных ВАХ;
8. 6. Фундаментальные уравнения физических процессов в объёме полупроводниковой структуры;;
9. 5. Кинетическое уравнение Больцмана, основные приближения и допущения в моделях элементов ИС;;
10. 4. Диффузионно-дрейфовое приближение, пределы применимости;;
11. 3. Модели полевых элементов и представления о методах идентификации параметров;;
12. 2. Интегральные схемы на основе полевых транзисторов;;
13. 1. Качественное описание работы МДП-транзистора..

3.4. Темы лабораторных работ не предусмотрено

3.5 Консультации

3.6 Тематика курсовых проектов/курсовых работ Курсовой проект/ работа не предусмотрены

3.7. Соответствие разделов дисциплины и формируемых в них компетенций

| Запланированные результаты обучения по дисциплине (в соответствии с разделом 1) | Коды индикаторов | Номер раздела дисциплины (в соответствии с п.3.1) | | | | | Оценочное средство (тип и наименование) |
|---|------------------|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| Знать: | | | | | | | |
| методы оптимизации параметров полупроводниковых полевых транзисторов | ИД-1ПК-2 | + | | | | | Контрольная работа/КМ-1 |
| основные физические процессы, определяющие параметры и математические модели полевых транзисторов | ИД-1ПК-2 | | + | | | | Контрольная работа/КМ-2 |
| Уметь: | | | | | | | |
| оценивать параметры моделей полупроводниковых приборов | ИД-1ПК-2 | | | + | | | Контрольная работа/КМ-3 |
| создавать модели полевых полупроводниковых приборов | ИД-1ПК-2 | | | | + | + | Расчетно-графическая работа/КМ-4 |

4. КОМПЕТЕНТНОСТНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЕ ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ОСВОЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (ТЕКУЩИЙ КОНТРОЛЬ УСПЕВАЕМОСТИ, ПРОМЕЖУТОЧНАЯ АТТЕСТАЦИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ)

4.1. Текущий контроль успеваемости

7 семестр

Форма реализации: Выполнение задания

1. КМ-2 (Контрольная работа)

Форма реализации: Защита задания

1. КМ-4 (Расчетно-графическая работа)

Форма реализации: Проверка задания

1. КМ-1 (Контрольная работа)
2. КМ-3 (Контрольная работа)

Балльно-рейтинговая структура дисциплины является приложением А.

4.2 Промежуточная аттестация по дисциплине

Экзамен (Семестр №7)

Оценка выставляется по результатам экзамена с учётом системы БАРС.

В диплом выставляется оценка за 7 семестр.

Примечание: Оценочные материалы по дисциплине приведены в фонде оценочных материалов ОПОП.

5. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

5.1 Печатные и электронные издания:

1. Старосельский, В. И. Физика полупроводниковых приборов микроэлектроники : учебное пособие для вузов по направлению 210100 "Электроника и микроэлектроника" / В. И. Старосельский . – М. : Юрайт, 2014 . – 463 с. – (Основы наук) . - ISBN 978-5-9916-0808-4 .;
2. Твердотельная электроника : учебное пособие для вузов по направлению "Электроника и микроэлектроника" / Э. Н. Воронков, [и др.] . – М. : АКАДЕМИЯ, 2009 . – 320 с. – (Высшее профессиональное образование) . - ISBN 978-5-7695-4618-1 .;
3. Шалимова, К. В. Физика полупроводников : учебник / К. В. Шалимова . – 4-е изд., стер . – М. : Лань-Пресс, 2010 . – 400 с. – (Учебники для вузов. Специальная литература) . - ISBN 978-5-8114-0922-8 .;
4. Шалимова К. В.- "Физика полупроводников", (4-е изд., стер.), Издательство: "Лань", Санкт-Петербург, 2021 - (384 с.)
<https://e.lanbook.com/book/167840>.

5.2 Лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение:

1. SmathStudio;
2. Libre Office;
3. ОС Linux;
4. GNU Octave.

5.3 Интернет-ресурсы, включая профессиональные базы данных и информационно-справочные системы:

1. ЭБС Лань - <https://e.lanbook.com/>
2. ЭБС "Университетская библиотека онлайн" - http://biblioclub.ru/index.php?page=main_ub_red
3. Электронная библиотека МЭИ (ЭБ МЭИ) - <http://elib.mpei.ru/login.php>

6. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

| Тип помещения | Номер аудитории, наименование | Оснащение |
|---|--|---|
| Учебные аудитории для проведения лекционных занятий и текущего контроля | К-102а, Учебная аудитория | парта, стул, доска меловая, ноутбук, кондиционер, телевизор |
| | К-105/1, Компьютерный класс | стол, стол для оргтехники, стол компьютерный, стул, доска меловая, мультимедийный проектор, компьютер персональный, кондиционер |
| Учебные аудитории для проведения практических занятий, КР и КП | К-105/1, Компьютерный класс | стол, стол для оргтехники, стол компьютерный, стул, доска меловая, мультимедийный проектор, компьютер персональный, кондиционер |
| Учебные аудитории для проведения промежуточной аттестации | К-102а, Учебная аудитория | парта, стул, доска меловая, ноутбук, кондиционер, телевизор |
| Помещения для самостоятельной работы | НТБ-302, Читальный зал отдела обслуживания учебной литературой | стул, стол письменный, компьютерная сеть с выходом в Интернет, компьютер персональный |
| Помещения для консультирования | К-109/2, Кабинет сотрудников каф. "ЭиН" | стол, стул, шкаф для документов, шкаф для хранения инвентаря, стол письменный, дипломные и курсовые работы студентов |
| Помещения для хранения оборудования и учебного инвентаря | К-115, Склад каф. "ЭиН" | стеллаж, инвентарь учебный |

БАЛЛЬНО-РЕЙТИНГОВАЯ СТРУКТУРА ДИСЦИПЛИНЫ

Физика МДП-структур

(название дисциплины)

7 семестр

Перечень контрольных мероприятий текущего контроля успеваемости по дисциплине:

- КМ-1 КМ-1 (Контрольная работа)
 КМ-2 КМ-2 (Контрольная работа)
 КМ-3 КМ-3 (Контрольная работа)
 КМ-4 КМ-4 (Расчетно-графическая работа)

Вид промежуточной аттестации – Экзамен.

| Номер раздела | Раздел дисциплины | Индекс КМ: | КМ-1 | КМ-2 | КМ-3 | КМ-4 |
|---------------|--|------------|------|------|------|------|
| | | Неделя КМ: | 4 | 8 | 12 | 16 |
| 1 | Основные понятия. | | | | | |
| 1.1 | Основные понятия. | | + | | | |
| 2 | Простейшие полевые приборы | | | | | |
| 2.1 | Простейшие полевые приборы | | | + | | |
| 3 | Модели полевых ИС | | | | | |
| 3.1 | Модели полевых ИС | | | | + | |
| 4 | ИС на основе полевых транзисторов | | | | | |
| 4.1 | ИС на основе полевых транзисторов | | | | | + |
| 5 | Транзисторы на основе широкозонных полупроводников и гетеропереходов. Особенности функционально ориентированных ИС | | | | | |
| 5.1 | Транзисторы на основе широкозонных полупроводников и гетеропереходов. Особенности функционально ориентированных ИС | | | | | + |
| Вес КМ, %: | | | 10 | 20 | 20 | 50 |