

## Программа учебной дисциплины «Физика электронных приборов и средств связи»

Утверждена

Академическим советом ООП

Протокол № 4 от «29» \_\_08\_\_2019 г.

Автор	Лысенко А.П.
Число кредитов	6
Контактная работа (час.)	100
Самостоятельная работа (час.)	128
Курс	3
Формат изучения дисциплины	Без использования онлайн курса

### I. ЦЕЛЬ, РЕЗУЛЬТАТЫ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ И ПРЕРЕКВИЗИТЫ

Целями освоения дисциплины «Физика электронных приборов и средств связи» являются формирование систематических знаний о явлениях и процессах в полупроводниках, используемых при разработке приборов твердотельной электроники; формирование представлений о достаточно сложных процессах в различного рода контактах, являющихся основой практически всех приборов современной микроэлектроники; ознакомление студентов с физическими процессами, происходящими в различных твердотельных приборах дискретного и интегрального исполнения.

В результате освоения дисциплины студент должен:

#### **знать:**

фундаментальные физические закономерности, определяющие свойства полупроводников; физические процессы в различных контактных системах, являющихся основой твердотельной и микроэлектроники; физические основы твердотельной и микроэлектроники: принципы действия основных приборов – биполярных и полевых транзисторов, тиристоров, СВЧ-диодов, их параметры и их конструктивные особенности дискретного и интегрального исполнения.

#### **уметь:**

проводить оценочные расчеты физических характеристик полупроводниковых материалов; применять полученные знания при теоретическом анализе и компьютерном моделировании устройств микроэлектроники.

#### **владеть:**

методами исследований в области физики полупроводников; информацией об областях применения и перспективах развития приборов и устройств твердотельной и микроэлектроники; методами экспериментальных исследований параметров и характеристик приборов твердотельной электроники; информацией об областях применения и перспективах развития приборов

Изучение дисциплины «Физика электронных приборов и средств связи» базируется на следующих дисциплинах:

- Физика;
- Математика;
- Теория электрических цепей

Основные положения дисциплины должны быть использованы в дальнейшем при изучении следующих дисциплин:

"Радиоэлектронные средства инфокоммуникационных систем".

## **II. СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**

### **Раздел 1. Зонная теория кристаллов и статистика равновесных и неравновесных носителей заряда в кристаллах.**

Обобществление электронов в твердых телах. Свойства энергетического спектра электронов, энергетические зоны. Дисперсионные зависимости. Групповая скорость движения электронов. Движение электронов под действием внешней силы. Эффективная масса носителей заряда.

Периодические граничные условия. Число состояний в зоне. Заполнение зон электронами и деление тел на металлы, диэлектрики и полупроводники. Дырки в полупроводниках. Примесные атомы в полупроводниках. Водородоподобная модель. Донорные и акцепторные полупроводники.

Функции плотности состояний для нижней части зоны проводимости и верхней части валентной зоны. Функция распределения Ферми – Дирака. Эффективная масса плотности состояний. Полная функция распределения. Вырожденные и невырожденные полупроводники. Функция распределения Максвелла – Больцмана.

Зависимость концентраций электронов и дырок в полупроводнике от энергии Ферми. Энергия Ферми и концентрация свободных носителей заряда в собственном полупроводнике.

Примесные полупроводники. Мелкая донорная примесь. Концентрация свободных носителей заряда и энергия Ферми в области слабой ионизации примеси и в области истощения примеси. Переход к собственной проводимости. Акцепторные полупроводники. Сильно легированные полупроводники. Компенсированные полупроводники. Многозарядные примесные центры.

Генерация и рекомбинация носителей заряда. Равновесные и неравновесные носители заряда в полупроводниках. Неравновесная функция распределения. Квазиуровни Ферми. Время жизни носителей заряда.

### **Раздел 2. Проводимость кристаллических тел**

Кинетическое уравнение Больцмана. Приближение времени релаксации. Эффективное сечение рассеяния. Типы центров рассеяния. Рассеяние на ионах примеси, на атомах примеси и дислокациях. Понятие о нормальных колебаниях решетки. Фононы. Рассеяние на тепловых колебаниях решетки.

Дрейф носителей заряда в электрическом поле. Электропроводность полупроводников. Зависимость подвижности носителей и электропроводности полупроводников от температуры. Дрейф в сильном электрическом поле.

### **Раздел 3. Контакт металл-полупроводник.**

Термоэлектронная эмиссия. Контактная разность потенциалов. Понятие плотного и не плотного электрического контакта. Выпрямляющий контакт к *n*- и *p*-полупроводнику: равновесная энергетическая диаграмма контакта, эпюры плотности объемного заряда и электрического поля, состояние термодинамического равновесия, изменение энергетической диаграммы контакта при смещении, вольт-амперная характеристика контакта. Антизапорные контакты к полупроводнику: равновесная энергетическая диаграмма контакта, прохождение тока через контакт. Омические контакты к полупроводникам.

#### Раздел.4. Физические процессы в р-п-переходе

Методы создания р-п-перехода. Равновесная энергетическая диаграмма. Контактная разность потенциалов в р-п-переходе. Решение уравнения Пуассона для области объемного заряда р-п-перехода. Эпюры плотности объемного заряда, электрического поля и потенциала в зоне перехода в равновесном состоянии. Равновесная толщина области объемного заряда. Изменение слоя объемного заряда под действием внешнего смещения, зарядовая (или барьерная) емкость р-п-перехода. Состояние термодинамического равновесия р-п-перехода. Нарушение термодинамического равновесия р-п-перехода под действие внешнего смещения. Качественная картина проводимости р-п-перехода при прямом и обратном смещении. Понятие инжекции и экстракции. Вольт-амперная характеристика «тонкого» р-п-перехода. Влияние сопротивления базы на вид вольт-амперной характеристики. Влияние температуры на вид вольт-амперной характеристики. Влияние процессов генерации и рекомбинации в области объемного заряда на вид вольт-амперной характеристики. Пробой р-п-перехода: тепловой пробой, лавинный пробой, туннельный пробой. Частотные и импульсные свойства р-п-перехода. Диффузионная емкость р-п-перехода.

#### Раздел.5. Биполярные транзисторы

Структура, принцип действия, схемы включения транзистора. Энергетическая диаграмма при нормальном включении. Анализ схемы с ОБ, усиление мощности. Усиление тока транзистором в схеме с ОЭ. Коэффициенты передачи токов эмиттера и базы. Зависимость коэффициента передачи тока базы от режима и температуры. Статические характеристики транзистора. Входные и выходные характеристики, характеристики передачи транзистора в схеме с общей базой и общим эмиттером. Сущность эффекта Эрли. Пробой транзистора. Модель Эберса-Молла. Влияние температуры на статические характеристики. Малосигнальные параметры и эквивалентные схемы транзистора. Физические схемы и собственные параметры. Параметры транзистора как линейного четырехполюсника. Зависимость малосигнальных параметров от постоянной составляющей тока на входе и напряжения на выходе. Частотные параметры транзистора. Работа транзистора с нагрузкой. Нагрузочная характеристика. Активный режим работы. Ключевой режим работы транзистора. Работа транзистора на импульсах. Переходные процессы в транзисторе.

Классификация транзисторов по мощности и по частоте. Методы формирования и основные типы транзисторных структур. Конструктивно-технологические особенности мощных транзисторов. Биполярные транзисторы как элементы интегральных микросхем.

#### Раздел 6. Полевые транзисторы с управляющим переходом

Полевые транзисторы с управляющим р-п-переходом. Структура и принцип действия. Статические выходные характеристики и характеристики передачи. Малосигнальные параметры и эквивалентные схемы. Разновидности полевых транзисторов.

Полевые транзисторы с управляющим барьером Шотки (ПТШ). Сравнительная характеристика арсенида галлия и кремния. Структура ПТШ. Принцип действия при работе в режимах обогащения и обеднения канала. Статические характеристики. Конструктивно-технологические особенности и основные параметры. ПТШ как элементы интегральных микросхем на основе арсенида галлия.

#### Раздел 7. МДП-транзисторы

Эффект электрического поля в полупроводниках. Идеальная структура металл-диэлектрик-полупроводник (МДП-структура). Энергетические диаграммы МДП-структуры в режимах обогащения, обеднения и инверсии. Пороговое напряжение. Особенности реальных МДП-структур.

Структура, принцип действия и схемы включения МДП-транзистора. Транзисторы с индуцированным и со встроенным каналом. Статические выходные характеристики. Перекрытие канала. Напряжение насыщения. Уравнения ВАХ для крутой и пологой частей характеристик. Характеристики передачи. Влияние температуры на статические характеристики. Пробой транзистора.

Малосигнальные параметры и эквивалентные схемы МДП-транзистора. Частотные свойства. Переходные процессы в МДП-транзисторе при работе в качестве электронного ключа.

Конструктивно-технологические разновидности транзисторов. Эффекты короткого канала в МДП-транзисторах. Зависимость порогового напряжения от длины канала и напряжения на стоке. Особенности статических характеристик короткоканальных транзисторов. Транзисторы с самосовмещенным затвором. МДП-транзисторы как элементы интегральных микросхем. Приборы с зарядовой связью (ПЗС).

## Раздел 8. Тиристоры

Структура и принцип действия диодного тиристора. Энергетические диаграммы. Открытое и закрытое состояние. Вольт-амперная характеристика. Суммарный коэффициент передачи тока тиристорной структуры. Пробой тиристора. Диодный тиристор с зашунтированным эмиттерным переходом.

Триодный тиристор. Принцип управления. Условие переключения. Симметричный тиристор. Способы управления тиристорами. Конструктивно-технологические особенности и параметры тиристорov.

## Раздел 9. СВЧ-генераторные диоды

Диоды Ганна. Лавинно-пролетные диоды. Туннельные диоды.

## Раздел 10. Фотоэлектрические приборы.

Светодиоды и твердотельные лазеры. Фотодетекторы (фоторезисторы, фотодиоды, фототранзисторы, фототиристоры). Солнечные батареи.

## **III. ОЦЕНИВАНИЕ**

**Активность на практических занятиях** оценивается по следующим критериям:

- ответы на вопросы, предлагаемые преподавателем;
- разбор ситуаций у доски;
- участие в дискуссии по предложенной проблематике;
- активность и вовлечённость в проводимые тренинги;
- интенсивность консультаций с преподавателем по выполнению домашнего задания.

**Домашнее задание** оценивается по следующим критериям:

- соблюдение структуры работы согласно заданию;
- соблюдение правил оформления отчёта о научно-исследовательской работе соглас-

но ГОСТ 7.32-2001;

- способность аргументировано объяснять на защите работы её выполнение.

**Итоговый экзамен по дисциплине** проводится в конце изучения курса после 4 модуля в присутствии преподавателя. Перед началом **экзамена по дисциплине** студенту выдаётся два вопроса по пройденному материалу, как на лекционных, так и на практических занятиях. Ответы на предложенные вопросы излагаются в устной форме. Использование каких-либо текстов, калькуляторов, телефонов и др. средств связи запрещается. Время подготовки к ответу на вопросы экзамена – 30 мин.

Оценки по всем формам текущего и итогового контроля выставляются по 10-ти балльной шкале.

Итоговая оценка формируется как взвешенная сумма оценки, накопленной в течение курса, и оценки за экзамен.

*Накопленная оценка* ( $O_{\text{нак}}$ ) (максимум 10 баллов) включает оценку за активность на семинарах ( $O_{\text{сем}}$ ), выполнение домашнего задания ( $O_{\text{дз}}$ ) и контрольные работы ( $O_{\text{кон}}$ ) и формируется по следующему правилу:

$$O_{\text{нак}} = 0,25 \cdot O_{\text{сем}} + 0,5 \cdot O_{\text{дз}} + 0,25 \cdot O_{\text{кон}}$$

*Итоговый экзамен* ( $O_{\text{экз}}$ ) (максимум 10 баллов): устный экзамен

*Результирующая оценка* ( $O_{\text{рез}}$ ) (максимум 10 баллов) по курсу определяется с учетом накопленной оценки  $O_{\text{нак}}$  (с весом 0,5) и оценки за экзамен в конце курса  $O_{\text{экз}}$  (с весом 0,5) по следующей формуле:

$$O_{\text{рез}} = 0,5 \cdot O_{\text{нак}} + 0,5 \cdot O_{\text{экз}}$$

*Пересдача по курсу* ( $O_{\text{п}}$ ) (первая, вторая) представляет собой устный экзамен, за который выставляется оценка (максимум 10 баллов).

*Результирующая оценка по курсу после пересдачи* ( $O_{\text{рез пер}}$ ) (*первой, второй*) определяется с учетом накопленной оценки  $O_{\text{нак}}$  (с весом 0,5) и оценки за пересдачу  $O_{\text{п}}$  (с весом 0,5) по следующей формуле:

$$O_{\text{рез пер}} = 0,5 \cdot O_{\text{нак}} + 0,5 \cdot O_{\text{п}}$$

Все округления производятся в соответствии с арифметическим способом.

Оценки за курс определяются по количественной десятибалльной и качественной шкалам.

Количество набранных баллов	Оценка по десятибалльной шкале	Оценка по пятибалльной шкале
9,5-10	10	отлично
8,5-9,4	9	отлично
7,5-8,4	8	отлично
6,5-7,4	7	хорошо
5,5-6,4	6	хорошо
4,5-5,4	5	хорошо
3,5-4,4	4	удовлетворительно
2,5-3,4	3	удовлетворительно
1,5-2,4	2	неуд.
0–1,4	1	неуд.

#### IV. ПРИМЕРЫ ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ

Контрольные вопросы к экзамену

- Зонная теория кристаллов
- Заполнение энергетических зон электронами. Деление тел на металлы, диэлектрики и полупроводники
- Колебания кристаллической решетки
- Акустические и оптические фононы
- Дисперсионные зависимости для фононов. Зона Бриллюэна
- Строение энергетических зон
- Движение электронов в кристалле
- Понятие эффективной массы
- Понятие о дырке
- Распределение энергетических состояний по энергии
- Функция заполнения состояний электронами. Энергия Ферми
- Вырожденный и невырожденный квантовый газ
- Полная функция распределения электронов по состояниям
- Собственный полупроводник
- Донорный полупроводник
- Акцепторный полупроводник
- Расположение энергии Ферми в кристаллах
- Зависимость энергии Ферми от температуры
- Равновесные и неравновесные свободные носители заряда в полупроводниках
- Время жизни свободных носителей заряда
- Механизмы рекомбинации
- Прямозонные и не прямозонные полупроводники
- Эффективная масса проводимости и эффективная масса плотности состояний
- Движение электрона под действием электрического поля
- Особенности рассеяния носителей заряда на фононах и на заряженной примеси
- Время релаксации импульса
- Удельная электропроводность кристаллов
- Понятие о подвижности электронов и дырок

- Зависимость подвижности невырожденного газа электронов и дырок от температуры
- Зависимость подвижности вырожденного газа электронов и дырок от температуры
- Зависимость проводимости кристаллов от температуры
- Внешняя и термодинамическая работа выхода электрона из кристалла
- Термоэлектронная эмиссия
- Контактная разность потенциалов.
- Прохождение тока через выпрямляющий контакт металл-полупроводник, ВАХ.
- Антизапорный контакт металл-полупроводник, ВАХ.
- Омические контакты.
- Способы получения р-n-перехода и его равновесное состояние (энергетическая диаграмма, эпюры плотности объемного заряда и напряженности электрического поля).
- Изменение энергетической диаграммы р-n-перехода при подаче прямого и обратного смещения.
- Инжекция и экстракция неосновных носителей заряда, граничные условия для р-n-перехода в условиях низкого уровня инжекции.
- ВАХ тонкого р-n-перехода с учетом сопротивления базы.
- Вольтфарадная характеристика р-n-перехода.
- Влияние температуры на ВАХ тонкого р-n-перехода.
- Механизм протекания стационарного прямого тока в р-n-переходе.
- Механизм протекания стационарного обратного тока в р-n-переходе.
- ВАХ тонкого р-n-перехода без учета сопротивления базы.
- ВАХ р-n-перехода с тонкой и толстой базой.
- Влияние процессов генерации и рекомбинации в слое объемного заряда р-n-перехода на его ВАХ.
- Эстафета передачи тока в р-n-переходе при прямом и обратном смещении.
- Граничные условия в р-n-переходе при низком уровне инжекции
- Граничные условия для р-n-перехода в условиях высокого уровня инжекции.
- Тепловой пробой р-n-перехода.
- Лавинный пробой р-n-перехода.
- Туннельный пробой р-n-перехода.
- Процесс восстановления обратного сопротивления р-n-перехода.
- Диффузионная емкость р-n-перехода на низкой частоте.

- Диффузионная емкость р-п-перехода на высокой частоте.
- Силовые выпрямительные диоды и их основные параметры.
- Стабилитроны и стабилитроны. Их основные параметры.

## 5. РЕСУРСЫ

### 5.1 Основная литература

1. Епифанов, Г. И. . Твердотельная электроника: учебник для вузов / Г. И. Епифанов, Ю. А. Мома. – М.: Высш. шк., 1986. – 304 с.
2. Пасынков, В. В. Полупроводниковые приборы: учеб. пособие / В. В. Пасынков, Л. К. Чиркин. – 8-е изд., испр. – СПб.: Лань, 2006. – 480 с. – (Сер. "Учебники для вузов. Специальная литература") . - ISBN 5-8114-0368-2.
3. Лысенко, А. П. Физические процессы в р-п-переходе: учеб. пособие / А. П. Лысенко. – М.: МИЭМ, 2009. – 99 с. - ISBN 978-5-945062-26-9.
4. Лысенко, А. П., Биополярные транзисторы.: учеб. пособие / А. П. Лысенко. – М.: МИЭМ, 2006. – 79 с. - ISBN 5-945061-53-0.

### 5.2 Дополнительная литература

1. Пихтин, А. Н., Оптическая и квантовая электроника: учебник / А. Н. Пихтин. – М.: Высшая школа, 2001. – 573 с. - ISBN 5-06-002703-1.
2. Ансельм, А. И. Введение в теорию полупроводников: учеб. пособие для вузов / А. И. Ансельм. – Изд. 3-е, стер. – СПб.: Лань, 2008. – 618 с. – (Сер. "Учебники для вузов. Специальная литература") (Сер. "Лучшие классические учебники") . - Ц(7.05). - ISBN 978-5-8114-0762-0.

### 5.3 Программное обеспечение

№ п/п	Наименование	Условия доступа
1.	Microsoft Windows 10	<i>Из внутренней сети университета (договор)</i>
2.	Microsoft Office Professional Plus 2010	<i>Из внутренней сети университета (договор)</i>

### 5.4 Материально-техническое обеспечение дисциплины

Учебные аудитории для лекционных занятий по дисциплине обеспечивают использование и демонстрацию тематических иллюстраций, соответствующих программе дисциплины в составе:

- ПЭВМ с доступом в Интернет (операционная система, офисные программы, антивирусные программы);
- мультимедийный проектор с дистанционным управлением.