

**ГОУ ВПО РОССИЙСКО-АРМЯНСКИЙ (СЛАВЯНСКИЙ)
УНИВЕРСИТЕТ**

Составлен в соответствии с
государственными требованиями к
минимуму содержания и уровню
подготовки выпускников по
направлению **11.03.03**
Конструирование и технология
электронных средств и Положением
«Об УМКД РАУ».

УТВЕРЖДАЮ:


Директор института
А.А. Сапкисян

21.07.2023

Инженерно-физический институт

Кафедра Технология материалов и структур электронной техники

Автор: *Доцент, к.т.н., Геворкян Владимир Арамович*

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС

Дисциплина: Б1.О.14 Физические основы микроэлектроники

Направление: 11.03.03 «Конструирование и технология электронных
средств»

ЕРЕВАН 2023

1. Аннотация

1.1. Выписка из ФГОС ВПО РФ по минимальным требованиям к дисциплине

В результате изучения курса лекций по предмету «физические основы микроэлектроники» обучающийся должен:

знать физические основы микроэлектроники, физические эффекты и процессы, лежащие в основе принципов действия полупроводниковых приборов

уметь определять параметры электронных приборов по их статическим параметрам

владеть навыками экспериментального определения статических характеристик и параметров различных электронных приборов и их компьютерного исследования по электрическим моделям

1.2. Взаимосвязь дисциплины с другими дисциплинами учебного плана специальности (направления)

Данная дисциплина взаимосвязана с такими дисциплинами как: Материалы и компоненты электронных средств, полупроводниковые приборы, схемотехника электронных средств.

1.3. Требования к исходным уровням знаний, умений и навыков студентов для прохождения дисциплины (что должен знать, уметь и владеть студент для прохождения данной дисциплины)

Студент должен:

знать основы по предметам: математического анализа, векторного анализа, дифференциальных уравнений, по общим курсам физики: электричество и магнетизм, оптика, атомная физика

уметь применять свои знания для решения задач по данному предмету

владеть навыками применения интегрального и дифференциального исчисления для решения однородных дифференциальных уравнений.

1.4. Предварительное условие для прохождения (дисциплины, изучение которых является необходимой базой для освоения данной дисциплины)

Общий курс физики, атомная физика, математический анализ, векторный анализ, дифференциальные уравнения

2. Содержание

2.1. Цели и задачи дисциплины

Содержание дисциплины направлено на ознакомление студентов с физическими процессами происходящими в полупроводниках и полупроводниковых структурах.

Цель преподавания дисциплины: ознакомление студентов с физическими эффектами и процессами происходящими в полупроводниках и лежащими в основе действия полупроводниковых приборов .

Учебная задача: обеспечить студентов знаниями в области основ зонной теории полупроводников, статистики электронов и дырок в полупроводниках, генерации и

рекомбинации неравновесных носителей заряда, диффузии и дрейфа неравновесных носителей заряда в полупроводниках для применения этих знаний в практических исследованиях.

2.2. Требования к уровню освоения содержания дисциплины

После изучения дисциплины студент должен:

- ***знать*** физические основы физики полупроводников и принципы действия, конструктивно-технологические особенности, основные характеристики и параметры приборов твердотельной электроники;
- ***уметь*** правильно выбирать приборы твердотельной электроники для применения в радиоэлектронной аппаратуре, использовать стандартную терминологию, определения, обозначения и единицы измерения физических величин;
- ***иметь*** представление об основных путях развития элементной базы электронной техники;
- ***владеть*** модельным, математическим и компьютерным инструментарием расчета простейших характеристик и параметров приборов твердотельной электроники.

2.3. Трудоемкость дисциплины и виды учебной работы (в академических часах и кредитах)

2.3.1. Объем дисциплины и виды учебной работы

Виды учебной работы	Всего, в акад. часах
Общая трудоемкость изучения дисциплины по семестрам, в т. ч.:	144
1. Аудиторные занятия, в т. ч.:	52
1.1. Лекции	34
1.2. Практические занятия	18
2. Самостоятельная работа, в т. ч.:	92
2.1. Подготовка к контрольным работам	52
2.2. Устный опрос	40
Итоговый контроль	зачет

2.3.2. Распределение объема дисциплины по темам и видам учебной работы

Разделы и темы дисциплины	Всего (ак. часов)	Лекции (ак. часов)	Прак. Зан. (ак. часов)
1	2=3+4	3	4
Модуль 1.			
Раздел 1. Кристаллические решетки	4	4	-
Тема 1.1. Решетки Бравэ, вектор трансляции	1	1	-
Тема 1.2. Простые и сложные решетки Бравэ (ячейка Вигнера-Зейтца)	1	1	-
Тема 1.3. Обозначение направлений и плоскостей в кристалле. Индексы Миллера.	1	1	-
Тема 1.4. Классификация кристаллов по типам связи.	1	1	-
Раздел 2. Дефекты в кристаллах	5	3	2
Тема 2.1. Точечные дефекты (дефекты по Френкелю, по Шоттки, примеси, центры окраски).	4	2	2
Тема 2.2. Линейные дефекты (вектор Бюргерса)	1	1	-
Раздел 3. Зонная теория	17	12	5
Тема 3.1. Основы зонной теории (металлы, полупроводники, диэлектрики).	2	2	-
Тема 3.2. Статистика электронов и дырок в полупроводниках.	2	2	-
Тема 3.3. Плотность электрических состояний.	2	1	1
Тема 3.4. Функция распределения Ферми-Дирака и Больцмана.	4	2	2
Тема 3.5. Концентрация электронов и дырок на примесных уровнях.	2	1	1
Тема 3.6. Концентрация электронов и дырок в вырожденных и невырожденных полупроводниках	2	1	1
Тема 3.7. Собственный полупроводник.	2	2	-
Тема 3.8. Зависимость положение уровня Ферми от концентрации примесей и температуры для невырожденного полупроводника.	1	1	-
Раздел 4. Генерация и рекомбинация неравновесных носителей заряда.	9	5	4
Тема 4.1. Равновесные и неравновесные носители заряда. Квазиуровни Ферми.	4	2	2
Тема 4.2. Биполярная световая генерация носителей заряда.	1	1	-
Тема 4.3. Виды рекомбинации.	2	1	1
Тема 4.4. Межзонная излучательная рекомбинация.	2	1	1
Раздел 5. Диффузия и дрейф неравновесных носителей заряда	13	8	5

Тема 5.1. Уравнение непрерывности.	2	1	1
Тема 5.2. Диффузионный и дрейфовый токи.	4	2	2
Тема 5.3. Соотношение Эйнштейна.	1	1	
Тема 5.4. Диффузия и дрейф неравновесных носителей заряда при монополярной проводимости.	2	2	-
Тема 5.5. Диффузия и дрейф неравновесных носителей заряда во внешнем электрическом поле.	3	1	2
Тема 5.6. Биполярная диффузия неравновесных носителей заряда.	1	1	-
Раздел 6. Контактные явления в полупроводниках	4	2	2
Тема 6.1. Полупроводники во внешнем электрическом поле. Дебаева длина экранирования.	2	1	1
Тема 6.2. Работа выхода. Термоэлектронная эмиссия.	2	1	1
ИТОГО	52	34	18

2.3.3. Содержание разделов и тем дисциплины

Введение

Раздел 1. Кристаллические решетки

Тема 1.1. Решетки Бравэ, вектор трансляции

Тема 1.2. Простые и сложные решетки Бравэ (ячейка Вигнера-Зейтца)

Тема 1.3. Обозначение направлений и плоскостей в кристалле. Индексы Миллера.

Тема 1.4. Классификация кристаллов по типам связи.

Раздел 2. Дефекты в кристаллах

Тема 2.1. Точечные дефекты (дефекты по Френкелю, по Шоттки, примеси, центры окраски).

Тема 2.2. Линейные дефекты (вектор Бюргерса)

Раздел 3. Зонная теория

Тема 3.1. Основы зонной теории (металлы, полупроводники, диэлектрики).

Тема 3.2. Статистика электронов и дырок в полупроводниках.

Тема 3.3. Плотность электрических состояний.

Тема 3.4. Функция распределения Ферми-Дирака и Больцмана.

Тема 3.5. Концентрация электронов и дырок на примесных уровнях.

Тема 3.6. Концентрация электронов и дырок в вырожденных и невырожденных полупроводниках

Тема 3.7. Собственный полупроводник.

Тема 3.8. Зависимость положение уровня Ферми от концентрации примесей и температуры для невырожденного полупроводника.

Раздел 4. Генерация и рекомбинация неравновесных носителей заряда.

Тема 4.1. Равновесные и неравновесные носители заряда. Квазиуровни Ферми.

Тема 4.2. Биполярная световая генерация носителей заряда.
Тема 4.3. Виды рекомбинации.
Тема 4.4. Межзонная излучательная рекомбинация.

Раздел 5. Диффузия и дрейф неравновесных носителей заряда

Тема 5.1. Уравнение непрерывности.
Тема 5.2. Диффузионный и дрейфовый токи.
Тема 5.3. Соотношение Эйнштейна.
Тема 5.4. Диффузия и дрейф неравновесных носителей заряда при монополярной проводимости
Тема 5.5. Диффузия и дрейф неравновесных носителей заряда во внешнем электрическом поле.
Тема 5.6. Биполярная диффузия неравновесных носителей заряда.

Раздел 6. Контактные явления в полупроводниках

Тема 6.1. Полупроводники во внешнем электрическом поле. Дебаева длина экранирования.
Тема 6.2. Работа выхода. Термоэлектронная эмиссия.

2.3.4. Краткое содержание практических занятий

- Точечные дефекты (дефекты по Френкелю, по Шоттки, примеси, центры окраски).
- Функция распределения Ферми-Дирака и Больцмана.
- Равновесные и неравновесные носители заряда. Квазиуровни Ферми.
- Виды рекомбинации.
- Межзонная излучательная рекомбинация.
- Диффузионный и дрейфовый токи.
- Диффузия и дрейф неравновесных носителей заряда во внешнем электрическом поле.
- Работа выхода. Термоэлектронная эмиссия.

2.4. Материально-техническое обеспечение дисциплины

- Вычислительная техника
- Проектор

3. Теоретический блок

3.1. Материалы по теоретической части курса

3.1.1. Учебники

1. Бонч-Бруевич В.Л., Калашников С.Г. Физика полупроводников. – М.: Наука, 1990.
2. Ансельм А.И. Введение в теорию полупроводников. – М.: Наука, 1978.
3. Шалимова К.В. Физика полупроводников. – М.: Высшая школа, 1976.
4. Кардона П.Ю. Основы полупроводников. – М.: Мир, 2003.
5. Sah C.T. Fundamentals of solid-state electronics / C.T. Sah. World Scientific, 1991.

3.1.2. Учебное пособие

1. Бонч-Бруевич В. Л., Звягин И.П., Карпенко И.В., Миронов А.Г. Сборник задач по физике полупроводников. – М.: Наука, 1987.

3.1.3. Кратки конспект лекций (краткие аннотации по каждой теме)

Введение. Во введении дана классификация веществ на полупроводники, металлы и диэлектрики по своим физическим и оптическим свойствам. Рассматривается наиболее простая классификация веществ по удельному сопротивлению и его зависимости от температуры. Рассматриваются различные типы полупроводниковых материалов, которые в настоящее время широко применяются в полупроводниковой электронике.

Раздел 1. Кристаллические решетки

Тема 1.1. Решетки Бравэ, вектор трансляции. В данном разделе даются два определения решеток Бравэ, первая как бесконечная периодическая структура и вторая - как решетка, образованная на основе векторов трансляции. Дано определение элементарной ячейки кристаллической структуры и рассмотрены варианты двумерной и трехмерной решеток Бравэ.

Тема 1.2. Простые и сложные решетки Бравэ (ячейка Зейтца). В этом разделе рассмотрены одномерные, двумерные и трехмерные решетки даны определения простой и сложной решеток. Дано строгое определение элементарной примитивной ячейки и расчет количества атомов в примитивной ячейке. Рассматриваются различные примеры трехмерных ячеек кубической структуры. Дается определение примитивной ячейки Вигнера-Зейтца. Описываются формы симметрии с помощью которых описываются кристаллы.

Тема 1.3. Обозначение направлений и плоскостей в кристалле. Индексы Миллера. В этом разделе дается определение индексов Миллера и как характеризуется положение кристаллической плоскости и кристаллографического направления с помощью индексов Миллера.

Тема 1.4. Классификация кристаллов по типам связи. В этом разделе рассматриваются основные типы химических связей в кристаллах. Отдельно рассматриваются ионные кристаллы и рассчитывается энергия связи в таких кристаллах. Рассматриваются атомные (ковалентные) кристаллы, как формируется ковалентная связь и особенности ковалентной связи ее направленность и насыщенность. Рассматриваются примеры ковалентной связи для

полупроводников. Рассматриваются также металлические кристаллы и молекулярные кристаллы. В частности, рассматриваются различные виды Ван-дер-Ваальсовских связей.

Раздел 2. Дефекты в кристаллах

Тема 2.1. Точечные дефекты (дефекты по Френкелю, по Шоттки, примеси, центры окраски). В данном разделе дается определение дефектов по Френкелю и по Шоттки и характер их возникновения. Рассматриваются дефекты, вызванные примесными атомами внедрения и замещения. Рассматривается также механизм возникновения центров окраски.

Тема 2.2. Линейные дефекты (вектор Бюргера). В данном разделе рассмотрены типы линейных дефектов к которым относятся краевые и винтовые дислокации. Дано определение контура Бюргера и как с помощью вектора Бюргера описывается количество дислокаций. Описывается возникновение «облаков» Кеттлера примесных атомов вокруг дислокаций. Дается определение плотности дислокаций и методов их определения.

Раздел 3. Зонная теория

Тема 3.1. Основы зонной теории (металлы, полупроводники, диэлектрики). В данном разделе рассматривается возникновение дискретного энергетического спектра на примере водородоподобного атома и рассчитывается энергия связи электрона. Вводится понятие главного, орбитального, магнитного и спинового квантовых чисел. Описывается распределение электронов по атомным оболочкам. Рассматривается возникновение зонной структуры в твердом теле как результат расщепления дискретных уровней при сближении атомов. В качестве примеров рассматриваются зонные структуры для лития, бериллия, германия и кремния. Дается объяснение электронной и дырочной проводимости в полупроводниках.

Тема 3.2. Статистика электронов и дырок в полупроводниках. Плотность энергетических состояний. В данном разделе дается определение плотности состояний и как рассчитывать концентрацию электронов в зоне проводимости. Рассчитывается плотность квантовых состояний для случая сферических зон.

Тема 3.3. Функция распределения Ферми-Дирака и Больцмана. В данном разделе дается определение функции распределения Ферми-Дирака и ее поведение при абсолютном нуле и отличном от нуля температуре. Рассматривается функция распределения Больцмана как частный случай функции распределения Ферми-Дирака.

Тема 3.4. Концентрация электронов и дырок на примесных уровнях. В данном разделе описывается как вычисляется концентрация электронов и дырок на уровнях примесных атомов.

Тема 3.5. Концентрация электронов и дырок. В данном разделе описывается как рассчитывается концентрация равновесных электронов и дырок в полупроводниках. Приводится вывод выражений для определения концентраций.

Тема 3.6. Концентрация электронов и дырок в вырожденных и невырожденных полупроводниках. В данном разделе дается определение вырожденных и невырожденных полупроводников. Приводится вывод выражений для определения концентрации электронов и дырок.

Тема 3.7. Собственный полупроводник. В данном разделе дается определение собственного полупроводника и вывод выражений для определения концентрации электронов и дырок. Приводится пример расчета концентрации собственных носителей в кремнии.

Тема 3.8. Зависимость положение уровня Ферми от концентрации примесей и температуры. В данном разделе приводится вывод выражений для определения зависимости положения уровня Ферми от температуры для вырожденного и невырожденного полупроводника.

Раздел 4. Генерация и рекомбинация неравновесных носителей заряда.

Тема 4.1. Равновесные и неравновесные носители заряда. Квазиуровни Ферми. В данном разделе дается понятие о равновесных и неравновесных носителях заряда. Приводится пример расчета тепловой релаксации неравновесных носителей. Дается понятие о квазиуровне Ферми для неравновесных носителей.

Тема 4.2. Биполярная световая генерация носителей заряда. В этом разделе дается понятие биполярной световой генерации, т.е. генерации при которой образуются два типа носителей заряда. Приводится вывод выражения для скорости и коэффициента рекомбинации. Приводится вывод выражения для определения скорости изменения концентрации неравновесных носителей заряда в результате рекомбинации при малом и сильном уровне освещения.

Тема 4.3. Виды рекомбинации. В данном разделе рассматриваются различные виды рекомбинаций, а именно, межзонная рекомбинация (излучательная, безизлучательная и Оже рекомбинация), рекомбинация через локальные центры и поверхностная рекомбинация.

Тема 4.4. Межзонная излучательная рекомбинация. В данном разделе рассчитывается время жизни неравновесных носителей при межзонной рекомбинации. Рассматриваются время жизни для собственного и легированного полупроводников.

Раздел 5. Диффузия и дрейф неравновесных носителей заряда

Тема 5.1. Уравнение непрерывности. В данном разделе дается вывод уравнения непрерывности для неравновесных носителей заряда в полупроводнике с учетом световой и тепловой генерации, рекомбинации, диффузии и дрейфа носителей заряда.

Тема 5.2. Диффузионный и дрейфовый токи. В данном разделе дается понятие о диффузионном потоке и токе, о дрейфовом токе.

Тема 5.3. Соотношение Эйнштейна. В данном разделе рассматривается неоднородный полупроводник в состоянии термодинамического равновесия и дается вывод соотношения между подвижностью и коэффициентом диффузии (соотношение Эйнштейна).

Тема 5.4. Диффузия и дрейф неравновесных носителей заряда при монополярной проводимости. В данном разделе рассматривается диффузия и дрейф неравновесных носителей когда неравновесные носители возникают при их возбуждении с примесных уровней. На основании уравнения Пуассона определяется распределение носителей заряда. Вводится понятие длины экранирования (Дебаевский радиус).

Тема 5.5. Монополярная световая генерация. В данном разделе рассматриваются процессы генерации неравновесных носителей в примесном полупроводнике, которые существенно отличаются от явлений в собственном полупроводнике. Изменение плотности объемного заряда после выключения света приводит к возникновению тока. На основе уравнения непрерывности заряда и уравнения Пуассона определяется закон изменения объемного заряда, который происходит за характерное время, которое называется максвелловским временем релаксации.

Тема 5.6. Термоэлектрические эффекты. В данном разделе рассматриваются эффект Зеебека, эффект Пельтье и эффект Томсона.

Раздел 6. Контактные явления в полупроводниках.

Тема 6.1. Полупроводники во внешнем электрическом поле. Дебаева длина экранирования. В этом разделе для понимания контактных явлений рассматривается полупроводник, внесенный в однородное электрическое поле конденсатора. Для невырожденного полупроводника на основе уравнения Пуассона вычисляется распределение потенциала, объемного заряда и концентрации носителей заряда. Выводится выражение для дебаевой длины экранирования и приводится пример численного расчета этой длины для полупроводников и металлов.

Тема 6.2. Работа выхода. Термоэлектронная эмиссия. В данном разделе определяется плотность тока, обусловленный термоэлектронной эмиссией электронов электронов из невырожденного полупроводника. Выводится выражение для термоэлектронного тока. Дается определение истинной и термодинамической работы выхода электрона.

4. Практический блок

4.1. План практичецких занятий

1. Точечные дефекты (дефекты по Френкелю, по Шоттки, примеси, центры окраски).
2. Функция распределения Ферми-Дирака и Больцмана.
3. Равновесные и неравновесные носители заряда. Квазиуровни Ферми.
4. Виды рекомбинации.
5. Межзонная излучательная рекомбинация.
6. Диффузионный и дрейфовый токи.
7. Диффузия и дрейф неравновесных носителей заряда во внешнем электрическом поле.
8. Работа выхода. Термоэлектронная эмиссия.

5. Материалы по оценке и контролю знаний

5.1. Образцы вариантов контрольных работ, тестов и/или других форм текущих и промежуточных контролей

Билет 1

1. Обозначение направлений и плоскостей в кристалле. Индексы Миллера.
2. Основы зонной теории. Валентные электроны, распределение электронов по атомным оболочкам. Образование зонной структуры у кремния и германия.

Билет 2

1. Классификация кристаллов по типам связи. Ионные кристаллы. Атомные (ковалентные) кристаллы. Металлические кристаллы. Молекулярные кристаллы.
2. Валентные электроны, распределение электронов по атомным оболочкам. Образование зонной структуры у кремния и германия.

5.2. Перечень экзаменационных вопросов

1. Решетки Браве. Вектор трансляции.
2. Простые и сложные решетки Бравэ. Ячейка Вигнера-Зейтца.
3. Обозначение направлений и плоскостей в кристалле. Индексы Миллера.
4. Классификация кристаллов по типам связи.
 - Ионные кристаллы
 - Атомные (ковалентные) кристаллы
 - Металлические кристаллы
 - Молекулярные кристаллы
5. Точечные дефекты
 - Дефекты по Френкелю
 - Дефекты по Шоттки
 - Примеси, центры окраски
6. Линейные дефекты
 - краевые дислокации, вектор Бюргера
 - винтовые дислокации
7. Валентные электроны, распределение электронов по атомным оболочкам
8. Образование зонной структуры у кремния и германия
9. Плотность энергетических состояний
10. Функция распределения Ферми-Дирака
11. Концентрация электронов и дырок на примесных уровнях
12. Концентрация электронов и дырок
13. Концентрация электронов и дырок в вырожденных и невырожденных полупроводниках (невырожденный полупроводник и полностью вырожденный полупроводник)
14. Собственный полупроводник (Невырожденный собственный полупроводник и вырожденный собственный полупроводник)
15. Равновесные и неравновесные носители заряда. Квазиуровни Ферми
16. Биполярная световая генерация носителей заряда
17. Виды рекомбинации. Межзонная излучательная рекомбинация.
18. Уравнение непрерывности
19. Диффузионный и дрейфовый токи
20. Соотношение Эйнштейна
21. Диффузия и дрейф неравновесных носителей заряда при монополярной проводимости.
22. Полупроводник во внешнем электрическом поле, Дебаева длина экранирования
23. Работа выхода

5.3. Образцы экзаменационных билетов

Билет 1

1. Решетки Браве. Вектор трансляции. Простые и сложные решетки Бравэ. Ячейка Вигнера-Зейтца.
2. Собственный полупроводник (Невырожденный собственный полупроводник и вырожденный собственный полупроводник)
3. Диффузия и дрейф неравновесных носителей заряда при монополярной проводимости.

Билет 2

1. Плотность энергетических состояний. Функция распределения Ферми-Дирака.
2. Равновесные и неравновесные носители заряда. Квазиуровни Ферми
3. Полупроводник во внешнем электрическом поле, Дебаева длина экранирования

6. Методический блок

6.1. Методика преподавания, обоснование выбора данной методики

Преподавание данного курса основывается на :

- Проведение лекционных занятий согласно тематическому плану.
- Контроль усвоенного материала
- Организация самостоятельной работы студентов.
- Проведение практических занятий.