

## 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***

<b>Виды учебной работы</b>	<b>Всего, в акад. часах</b>
<b>Общая трудоемкость изучения дисциплины по семестрам, в т. ч.:</b>	<b>108</b>
1. Аудиторные занятия, в т. ч.:	<b>54</b>
1.1. Лекции	<b>36</b>
1.2. Практические занятия	<b>18</b>
2. Самостоятельная работа, в т. ч.:	<b>90</b>
2.1. Подготовка к контрольным работам	<b>50</b>
2.2. Устный опрос	<b>40</b>
Итоговый контроль	<b>зачет</b>

### ***2.3.2. Распределение объема дисциплины по темам и видам учебной работы***

<b>Разделы и темы дисциплины</b>	<b>Всего (ак. часов)</b>	<b>Лекции (ак. часов)</b>	<b>Прак. Зан. (ак. часов)</b>
<b>1</b>	<b>2=3+4</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
<b>Модуль 1.</b>			
<b>Раздел 1. Кристаллические решетки</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>-</b>
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	-
<b>Раздел 2. Дефекты в кристаллах</b>	<b>5</b>	<b>3</b>	<b>2</b>
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	-
<b>Раздел 3. Зонная теория</b>	<b>17</b>	<b>12</b>	<b>5</b>
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	-
<b>Раздел 4. Генерация и рекомбинация неравновесных носителей заряда.</b>	<b>11</b>	<b>7</b>	<b>4</b>
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.	3	2	1
Тема 4.4. Межзонная излучательная рекомбинация.	3	2	1
<b>Раздел 5. Диффузия и дрейф неравновесных носителей заряда</b>	<b>13</b>	<b>8</b>	<b>5</b>

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	-
<b>Раздел 6. Контактные явления в полупроводниках</b>	<b>4</b>	<b>2</b>	<b>2</b>
Тема 6.1. Полупроводники во внешнем электрическом поле. Дебаева длина экранирования.	2	1	1
Тема 6.2. Работа выхода. Термоэлектронная эмиссия.	2	1	1
<b>ИТОГО</b>	<b>54</b>	<b>36</b>	<b>18</b>

### 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 из невырожденного полупроводника. Выводится выражение для термоэлектронного тока. Дается определение истинной и термодинамической работы выхода электрона.

## **4. Практический блок**

### ***4.1. План практических 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.