

**ГОО ВПО Российско-Армянский (Славянский)
университет**

Директор Института

А.К. Агаронян



«30» апреля 2025г., протокол № 05

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДИСЦИПЛИНЫ

**Наименование дисциплины: Б1.О.14 Физические основы
микроэлектроники**

Автор (ы) к.т.н., ст. науч. сотр. Геворкян Владимир Арамович
Ф.И.О, ученое звание (при наличии), ученая степень (при наличии)

**Направление подготовки: 11.03.03 Конструирование и технология
электронных средств**

Согласовано:

Заведующий Кафедрой общей физики и квантовых наноструктур

Айрапетян Д.Б.



(подпись)

1. АННОТАЦИЯ

1.1. Краткое описание содержания данной дисциплины;

Дисциплина посвящена изучению фундаментальных физических явлений, лежащих в основе работы микроэлектронных материалов и устройств. В курсе рассматриваются типы кристаллических решеток и дефектов в кристаллах, их влияние на свойства твердых тел. Особое внимание уделяется зонной теории: распределению электронных состояний, статистике носителей заряда, а также их концентрации в различных режимах. Также изучаются процессы генерации и рекомбинации неравновесных носителей, механизмы диффузии и дрейфа, включая влияние электрического поля. Завершающий раздел курса охватывает контактные явления, включая экранирование, термоэлектронную эмиссию и работу выхода, что имеет ключевое значение для понимания процессов в полупроводниковых приборах.

1.2. Трудоемкость в академических кредитах и часах, формы итогового контроля (экзамен/зачет);

4 академических кредита / 144 часа. Форма итогового контроля — зачет.

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

Физические основы нанoeлектроники, Схемо- и системотехника электронных средств, Микропроцессорные системы.

1.4. Результаты освоения программы дисциплины:

Код компетенции (в соответствии рабочим с учебным планом)	Наименование компетенции (в соответствии рабочим с учебным планом)	Код индикатора достижения компетенций (в соответствии рабочим с учебным планом)	Наименование индикатора достижений компетенций (в соответствии рабочим с учебным планом)
ОПК-1	Способен использовать положения, законы и методы естественных наук и математики для решения задач инженерной деятельности	ОПК-1.1 ОПК-1.2	Знает фундаментальные законы природы и основные физические математические законы Умеет применять физические законы и математически

		ОПК-1.3	методы для решения задач теоретического и прикладного характера Владеет навыками использования знаний физики и математики при решении практических задач
--	--	---------	--

2. УЧЕБНАЯ ПРОГРАММА

2.1. Цели и задачи дисциплины

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. Трудоемкость дисциплины и виды учебной работы (в академических часах и зачетных единицах) *(удалить строки, которые не будут применены в рамках дисциплины)*

Виды учебной работы	Всего, в акад. часах	Распределение по семестрам
		1 сем
1	2	3
1. Общая трудоемкость изучения дисциплины по семестрам, в т. ч.:	144	144
1.1. Аудиторные занятия, в т. ч.:	48	48
1.1.1. Лекции	32	32
1.1.2. Практические занятия, в т. ч.	16	16
1.2. Самостоятельная работа, в т. ч.:	96	96
1.2.1. Подготовка к контрольным работам		
1.2.2. Устный опрос		
Итоговый контроль (Экзамен, Зачет, диф. зачет - указать)	Зачет	Зачет

2.3. Содержание дисциплины

2.3.1. Тематический план и трудоемкость аудиторных занятий (модули, разделы дисциплины и виды занятий) по рабочему учебному плану

Разделы и темы дисциплины	Всего (ак. часов)	Лекции(ак. часов)	Практ. Занятия (ак. часов)
1	2=3+4+5+6+7	3	4
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	4	2	2
Тема 2.2. Линейные дефекты (вектор Бюргерса)	1	1	-
Раздел 3. Зонная теория	14	10	4
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	1	1
Тема 3.5. Концентрация электронов и дырок на примесных уровнях.	2	1	1
Тема 3.6. Концентрация электронов и дырок в вырожденных и невырожденных	2	1	1
Тема 3.7. Собственный полупроводник.	2	1	-
Тема 3.8. Зависимость положение уровня Ферми от концентрации примесей и	1	1	-
Раздел 4. Генерация и рекомбинация неравновесных носителей	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.	3	1	1

Тема 4.4. Межзонная излучательная рекомбинация.	3	1	1
Раздел 5. Диффузия и дрейф неравновесных носителей	12	8	4
Тема 5.1. Уравнение непрерывности.	2	1	1
Тема 5.2. Диффузионный и дрейфовый токи.	4	2	1
Тема 5.3. Соотношение Эйнштейна.	1	1	
Тема 5.4. Диффузия и дрейф неравновесных носителей заряда при монополярной	2	2	-
Тема 5.5. Диффузия и дрейф неравновесных носителей заряда во внешнем	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	2	1	1
Тема 6.2. Работа выхода. Термоэлектронная эмиссия.	2	1	1
ИТОГО	48	32	16

2.3.2. Краткое содержание разделов дисциплины в виде тематического плана

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.

2.3.3. Краткое содержание семинарских/практических занятий/лабораторного практикума

В рамках практических занятий рассматриваются особенности точечных дефектов в кристаллах, включая дефекты по Френкелю, Шоттки, а также роль примесей и центров окраски. Изучается применение распределений Ферми–Дирака и Больцмана для описания

статистики носителей заряда в полупроводниках. Анализируются процессы генерации и рекомбинации носителей, включая межзонную излучательную рекомбинацию, и строятся диаграммы с квазиуровнями Ферми в неравновесных условиях. Отдельное внимание уделяется изучению дрейфового и диффузионного тока, а также комбинированным процессам переноса носителей в электрическом поле.

2.3.4. Материально-техническое обеспечение дисциплины

- Вычислительная техника
- Проектор

2.4. Модульная структура дисциплины с распределением весов по формам контролей

Формы контролей	Вес формы (форм) текущего контроля в результирующей оценке текущего контроля (по модулям)		Вес формы промежуточного контроля в итоговой оценке промежуточного контроля		Вес итоговой оценки промежуточного контроля в результирующей оценке промежуточных контролей		Вес итоговой оценки промежуточного контроля в результирующей оценке промежуточных контролей (семестровой оценке)	Веса результирующей оценки промежуточных контролей и оценки итогового контроля в результирующей оценке итогового контроля
	M1 ¹	M2	M1	M2	M1	M2		
Вид учебной работы/контроля								
Контрольная работа <i>(при наличии)</i>			0.5	0.5				
Устный опрос <i>(при наличии)</i>								
Лабораторные работы <i>(при наличии)</i>	0.5	0.5						
Письменные домашние задания <i>(при наличии)</i>								
<i>Решение задач</i>	0.5	0.5						
Веса результирующих оценок текущих контролей в итоговых оценках промежуточных контролей					0.5	0.5		
Веса оценок промежуточных контролей в итоговых оценках промежуточных контролей								
Вес итоговой оценки 1-го промежуточного контроля в результирующей оценке промежуточных контролей							0.5	
Вес итоговой оценки 2-го промежуточного контроля в результирующей оценке промежуточных контролей							0.5	
Вес результирующей оценки промежуточных контролей в результирующей оценке итогового контроля								0.5
Вес итогового контроля (Экзамен/зачет) в результирующей оценке итогового контроля								0.5

¹ Учебный Модуль

	$\Sigma = 1$	$\Sigma = 1$	$\Sigma = 1$	$\Sigma = 1$	$\Sigma = 1$	$\Sigma = 1$	$\Sigma = 1$	$\Sigma = 1$
--	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------

3. Теоретический блок *(указываются материалы, необходимые для освоения учебной программы дисциплины)*

3.1. Материалы по теоретической части курса

3.1.1. Учебник(и);

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.

4. Фонды оценочных средств *(указываются материалы, необходимые для проверки уровня знаний в соответствии с содержанием учебной программы дисциплины).*

4.1. Планы практических и семинарских 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.

4.1.1. Задачники (практикумы);

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

4.2. Вопросы и задания для самостоятельной работы студентов

- [1] Объясните природу точечных дефектов: дефекты по Френкелю и по Шоттки. Приведите примеры и сравните их влияние на свойства полупроводников.
- [2] Охарактеризуйте примесные дефекты и центры окраски. Как они влияют на проводимость кристаллов?
- [3] Выведите функцию распределения Ферми–Дирака. В каких случаях можно использовать приближение распределения Больцмана?

- [4] Определите понятия равновесных и неравновесных носителей заряда. Как изменяется положение уровня Ферми при освещении полупроводника?
- [5] Постройте энергетическую диаграмму с квазиуровнями Ферми для освещённого p-n перехода.
- [6] Сравните различные виды рекомбинации: межзонную излучательную, через уровни в запрещённой зоне, поверхностную.
- [7] Объясните механизм межзонной излучательной рекомбинации. Где она находит практическое применение?
- [8] Запишите выражения для диффузионного и дрейфового токов. В каких условиях доминирует каждый из них?
- [9] Опишите поведение неравновесных носителей в присутствии внешнего электрического поля. Какие физические процессы при этом происходят?
- [10] Раскройте понятие "работа выхода". Как она связана с термоэлектронной эмиссией? Приведите формулу Ричардсона.
- [11] Рассчитайте ток насыщения для термоэмиссионного контакта при заданной температуре и работе выхода.
- [12] Приведите примеры использования термоэлектронной эмиссии в приборах.

4.3. 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.

4.4. Перечень зачетных 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 Бюргерса
 - 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

4.5. Образцы зачетных билетов

ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ Кафедра общей физики и квантовых наноструктур

Направление: Конструирование и технология электронных средств
Дисциплина: Физические основы микроэлектроники
(бакалавриат III -ий курс, I-ый семестр)

Зачетный билет № **

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.

Зав. кафедрой ОФКН _____ Д.Б. Айрапетян
20__г.
