

**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе
Российской академии наук**

УТВЕРЖДАЮ

Зам. директора Института по научной работе
Лебедев С.В.



20 14 г

**ПРОГРАММА
КАНДИДАТСКОГО ЭКЗАМЕНА ПО СПЕЦИАЛЬНОСТИ
01.04.10 «Физика полупроводников»**

Ильин

Введение

В основу настоящей программы положены основные разделы физики полупроводников, касающиеся основных физических проблем данной области, основ технологии и работы приборов на базе полупроводниковых материалов.

1. Химическая связь и атомная структура полупроводников

- Электронная конфигурация внешних оболочек атомов и типы сил связи в твердых телах. Ван-дер-ваальсова, ионная и ковалентная связь.
- Структуры важнейших полупроводников - элементов A^{IV} , A^{VI} и соединений типов $A^{III}B^V$, $A^{II}B^{VI}$, $A^{IV}B^{VI}$.
- Симметрия кристаллов. Трансляционная симметрия кристаллов. Базис и кристаллическая структура. Элементарная ячейка. Примитивная ячейка. Ячейка Вигнера-Зейтца. Решетка Браве. Обозначения узлов, направлений и плоскостей в кристалле. Обратная решетка, ее свойства. Зона Бриллюэна.
- Примеси и структурные дефекты в кристаллических и аморфных полупроводниках. Химическая природа и электронные свойства примесей. Точечные, линейные и двумерные дефекты.

2. Основы технологии полупроводников и методы определения их параметров

- Методы выращивания объемных монокристаллов из жидкой и газовой фаз.
- Методы выращивания эпитаксиальных пленок (эпитаксия из жидкой и газовой фазы).
- Молекулярно-лучевая эпитаксия. Металлорганическая эпитаксия.
- Методы легирования полупроводников.
- Основные методы определения параметров полупроводников: ширины запрещенной зоны, подвижности и концентрации свободных носителей, времени жизни неосновных носителей, концентрации и глубины залегания уровней примесей и дефектов.

3. Основы зонной теории полупроводников

- Основные приближения зонной теории. Волновая функция электрона в периодическом поле кристалла. Теорема Блоха. Зона Бриллюэна. Энергетические зоны.
- Законы дисперсии для важнейших полупроводников. Изоэнергетические поверхности. Тензор обратной эффективной массы. Плотность состояний. Особенности Ван-Хова.
- Уравнения движения электронов и дырок во внешних полях. Метод эффективной массы. Искривление энергетических зон в электрическом поле. Движение электронов и дырок в магнитном поле. Определение эффективных масс из циклотронного (диамагнитного) резонанса. Связь зонной структуры с оптическими свойствами полупроводника.
- Уровни энергии, создаваемые примесными центрами в полупроводниках. Доноры и акцепторы. Мелкие и глубокие уровни. Водородоподобные примесные центры.

4. Равновесная статистика электронов и**дырок в полупроводниках**

- Функция распределения электронов. Концентрация электронов и вырожденный электронный (дырочный) газ. Концентрации электронов и дырок на локальных уровнях. Факторы вырождения примесных состояний.
- Положение уровня Ферми и равновесная концентрация электронов и дырок в собственных и примесных (некомпенсированных и компенсированных) полупроводниках. Многозарядные примесные центры.

5. Кинетические явления в полупроводниках

- Кинетические коэффициенты - проводимость, постоянная Холла и тер-мо-ЭДС. Дрейфовая скорость, дрейфовая и холловская подвижности, фактор Холла. Дрейфовый и диффузионный ток. Соотношение Эйнштейна.
- Механизмы рассеяния носителей заряда в неидеальной решетке. Взаимодействие носителей заряда с акустическими и оптическими фононами. Рассеяние носителей заряда на заряженных и нейтральных примесях. Горячие электроны. Отрицательная дифференциальная проводимость. Электрические неустойчивости; электрические домены и токовые шнуры.

6. Рекомбинация электронов и дырок в полупроводниках

- Генерация и рекомбинация неравновесных носителей заряда. Квазиравновесие, квазиуровни Ферми. Уравнение кинетики рекомбинации. Времена жизни. Фотопроводимость.
- Механизмы рекомбинации. Излучательная и безызлучательная рекомбинация. Межзонная рекомбинация. Рекомбинация через уровни примесей и дефектов. Центры прилипания. Оже-рекомбинация.
- Пространственно неоднородные неравновесные распределения носителей заряда. Амбиполярная диффузия. Эффект Дембера. Длина диффузии неравновесных носителей заряда.

7. Контактные явления в полупроводниках

- Схема энергетических зон в контакте металл-полупроводник. Обогащенные, обедненные и инверсионные слои пространственного заряда вблизи контакта. Вольт-амперная характеристика барьера Шоттки.
- Энергетическая диаграмма $p-n$ перехода. Инжекция неосновных носителей заряда в $p-n$ переходе.
- Гетеропереходы. Энергетические диаграммы гетеропереходов. Варизонные полупроводники.

8. Свойства поверхности полупроводников

- Поверхностные состояния и поверхностные зоны. Искривление зон, распределение заряда и потенциала вблизи поверхности. Поверхностная рекомбинация.
- Эффект поля.
- Таммовские уровни. Скорость поверхностной рекомбинации.

9. Оптические явления в полупроводниках

- Комплексная диэлектрическая проницаемость, показатель преломления, коэффициент отражения, коэффициент поглощения. Связь между ними и соотношения Крамерса—Кронига.
- Межзонные переходы. Край собственного поглощения в случае прямых и непрямых, разрешенных и запрещенных переходов. Экситонное поглощение и излучение. Спонтанное и вынужденное излучение.
- Поглощение света на свободных носителях заряда.
- Поглощение света на колебаниях решетки. Рассеяние света колебаниями решетки, комбинационное рассеяние на оптических фононах (Рамана-Ландсберга), рассеяние на акустических фононах (Бриллюэна-Мандельштама).
- Влияние примесей на оптические свойства. Примесная структура оптических спектров вблизи края собственного поглощения в прямозонных и непрямозонных полупроводниках. Межпримесная излучательная рекомбинация. Экситоны, связанные на примесных центрах.
- Оптические явления во внешних полях. Эффект Франца-Келдыша. Эффект Погкельса.
- Эффект Бурштейна-Мосса. Эффекты Фарадея и Фойгта.

10. Фотоэлектрические явления

- Примесная и собственная фотопроводимость. Влияние прилипания неравновесных носителей заряда на фотопроводимость.
- Оптическая перезарядка локальных уровней и связанные с ней эффекты. Термостимулированная проводимость.
- Фоторазогрев носителей заряда. Фотоэлектромагнитный эффект.

11. Некристаллические полупроводники

- Аморфные и стеклообразные полупроводники. Структура атомной матрицы некристаллических полупроводников. Идеальное стекло. Гидрированные аморфные полупроводники.
- Особенности электронного энергетического спектра неупорядоченных полупроводников. Плотность состояний. Локализация электронных состояний. Щель подвижности.
- Легирование некристаллических полупроводников.
- Механизмы переноса носителей заряда. Прыжковая проводимость. Закон Мотта.
- Спектры оптического поглощения некристаллических материалов. Правило Урбаха.
- Нестационарные процессы. Определение дрейфовой подвижности по измерениям времени пролета. Дисперсионный перенос.
- Влияние внешних воздействий на свойства некристаллических полупроводников. Метастабильные состояния.

12. Полупроводниковые структуры**пониженной размерности и сверхрешетки**

- Размерное квантование. Двумерные и квазидвумерные электронные системы и структуры, в которых они реализуются. Контра- и ковариантные композиционные сверхрешетки, легированные сверхрешетки легирования. Квантовые нити. Квантовые точки. Энергетический спектр электронов и плотность состояний в этих системах.
- Оптические явления в структурах с квантовыми ямами, правила отбора для межзонных и внутризонных (межподзонных) переходов. Межзонное поглощение и излучательная рекомбинация в этих структурах. Экситоны в квантовых ямах, квантово-размерный эффект Штарка.
- Электрические и гальваномагнитные явления в двумерных структурах. Эффект Шубникова-де Гааза. Общее представление о квантовом эффекте Холла.

13. Принципы действия полупроводниковых приборов

- Вольтамперная характеристика р-п перехода. Приборы с использованием р-п переходов.
- Туннельный диод. Диод Ганна. Биполярный транзистор. Тиристор.
- Энергетическая диаграмма структуры металл-диэлектрик-полупроводник
- (МДП). Полевые транзисторы на МДП-структурах. Приборы с зарядовой связью.
- Шумы в полупроводниковых приборах.
- Фотоэлементы и фотодиоды. Спектральная чувствительность и обнаружительная способность. Полупроводниковые детекторы ядерных излучений. Фотоэлектрические преобразователи, КПД преобразования.
- Светодиоды и полупроводниковые лазеры. Инжекционные лазеры на основе двойной гетероструктуры.
- Использование наноструктур в полупроводниковых приборах. Гетеротранзистор с двумерным электронным газом (НЕМТ). Гетеролазеры на основе структур с квантовыми ямами и квантовыми точками. Резонансное туннелирование в двухбарьерной гетероструктуре и резонансно-туннельный диод. Оптический модулятор на основе квантово-размерного эффекта Штарка.

БИЛЕТ №1

1. Кристаллические решетки. Трансляционная симметрия. Решетки Бравэ. Сингония.
2. Аморфные и стеклообразные полупроводники.

БИЛЕТ №2

1. Зонная структура полупроводников (A^3B^5, A^2B^6, A^4)
2. Диэлектрическая проницаемость однородного электронного газа в полупроводниках.

БИЛЕТ №3

1. Основные методы определения параметров полупроводников: ширины запрещенной зоны, подвижности и концентрации свободных носителей, уровней примесей и дефектов.
2. Собственная и примесная фотопроводимость.

БИЛЕТ №4

- 1.Связь структуры кристаллов с характером химической связи. Типы сил связи. Энергия связи.
- 2.Плазменные колебания.

БИЛЕТ №5

- 1.Упругие свойства кристаллической решетки. Тензор деформаций и тензор напряжений. Модули упругости и упругие постоянные кристаллов разных классов.
- 2.Механизмы рассеяния носителей заряда.

БИЛЕТ №6

- 1.Колебания кристаллической решетки. Акустические и оптические ветви колебаний. Фононы.
- 2.Основные экспериментальные методы измерения диэлектрических потерь в переменном электрическом поле.

БИЛЕТ №7

- 1.Волновая функция электрона в периодическом поле кристаллической решетки. Зоны Бриллюэна. Энергетические зоны.
- 2.Пьезоэлектрические явления в кристаллах.

БИЛЕТ №8

- 1.Метод сильной связи. Зоны дисперсии. Металлы и полупроводники.
- 2.Оптические явления в структурах с квантовыми ямами. Правила отбора для межзонных и внутризонных переходов.

БИЛЕТ №9

- 1.Метод эффективной массы. Зонная структура полупроводников. Электроны и дырки.
- 2.Оптические свойства прямозонных и непрямозонных полупроводников.

БИЛЕТ №10

- 1.Полупроводниковые структуры пониженной размерности. Энергетический спектр электронов в этих системах.
2. Поглощение электромагнитных волн колебаниями решетки.

БИЛЕТ №11

1. Движение носителей в постоянном, однородном магнитном поле. (классическая теория.) Циклотронный резонанс.
2. Фотолюминесценция полупроводников.

БИЛЕТ №12

1. Движение носителей в постоянном, однородном магнитном поле (квантовая теория). Эффекты Шубникова-де Газа и квантовый эффект Холла.
2. Рекомбинационное излучение в диэлектриках и полупроводниках.

БИЛЕТ № 13 Движение и энергетический спектр носителей в постоянном электрическом поле.

1. Оптические квантовые генераторы (лазеры) и принципы их действия

БИЛЕТ № 14

Статистика электронов. Распределение Ферми-Дирака.

Концентрация электронов и дырок. Вырожденные и невырожденные полупроводники.

2. Использование наноструктур в полупроводниковых приборах.

БИЛЕТ №15

1. Распределение Гиббса.

2. Поглощение света свободными носителями. Плазменное отражение.

БИЛЕТ №16

1. Уровень Ферми в собственном полупроводнике и в полупроводнике с примесью одного типа.

2. Магнитооптические явления. Эффекты Фарадея и Фохта.

БИЛЕТ №17

1. Поверхностные состояния и поверхностные зоны. Поверхностная рекомбинация.

1. Электрооптические явления. Эффекты Поккельса, Керра, Франца-Келдыша.

2.

БИЛЕТ №18

1. Кинетическое уравнение Больцмана для электронов. Интеграл столкновений. Приближение времени релаксации.

2. Нелинейная оптика: генерация второй гармоники.

БИЛЕТ №19

1. Кинетические эффекты: проводимость, постоянная Холла и термоэдс.

2. Междузонные оптические переходы в сильно легированных полупроводниках. Эффект Бурштейна-Мосса.

БИЛЕТ №20

1. Подвижность носителей в полупроводниках и диэлектриках.

2. Фотопроводимость и фотоэлектромагнитный эффект.

БИЛЕТ №21

1. Прыжковая проводимость.

2. Теплопроводность кристаллов.

БИЛЕТ № 22

1. Горячие электроны. Доменная неустойчивость.
2. Дефекты по Френкелю и Шоттки.

БИЛЕТ №23

1. Неравновесные электроны и дырки. Механизмы рекомбинации неравновесных носителей заряда.
2. Поляроны большого и малого радиуса.

БИЛЕТ №24

1. п-р-переход и его свойства. Туннельный эффект в п-р-переходе. Туннельный диод. Биполярный транзистор.
2. Экситон.

БИЛЕТ №25

1. Гетеропереход и его свойства. Энергетические диаграммы гетеропереходов.
2. Теплоемкость кристаллов. Теории Дебая, Эйнштейна, Борна.

БИЛЕТ №26

1. Контактные явления. Работа выхода. Контактная разность потенциалов. Распределение концентрации и потенциала в слое объемного заряда.
2. Использование наноструктур в полупроводниковых приборах (гетеролазер, гетеротранзистор, резонансно-туннельный диод)

БИЛЕТ №27

1. Механизмы переноса тока в тонких диэлектрических пленках в системе металл-диэлектрик-металл. Контакт металл-полупроводник. Барьер Шоттки.
2. Экспериментальное определение типа, концентрации и подвижности носителей заряда.

БИЛЕТ №28

1. Типы процессов рекомбинации.
2. Выпрямление в контакте металл-полупроводник. Диффузионная и диодная теория.

БИЛЕТ №29

1. Поверхностные электронные состояния.
2. Экспериментальное определение энергетических уровней и концентрации примесных атомов из электрических измерений.

БИЛЕТ №30

1. Фотоэлементы и фотодиоды.
2. Основные приближения зонной теории. Волновая функция электронов в периодическом поле кристалла. Теорема Блоха.

БИЛЕТ №31

1. Сильнолегированные полупроводники. Хвосты плотности состояний. Методы легирования полупроводников.
2. Фотолюминесценция. Электролюминесценция.

БИЛЕТ №32

1. Явление пробоя, Типы пробоев. Ударная ионизация.
2. Методы выращивания эпитаксиальных пленок. Молекулярно-лучевая эпитаксия. Металлорганическая эпитаксия.

БИЛЕТ №33

1. Лавинный и туннельный пробой в р-п-переходе в полупроводниках. Использование пробоя в приборах.
2. Уровни энергии, создаваемые примесными центрами в полупроводниках. Доноры и акцепторы. Мелкие и глубокие уровни. Водородоподобные примесные центры.

▪

Основная литература

1. Бонч-Бруевич В.Л., Калашников С.Г. Физика полупроводников. М.: Наука, 1979.
2. Займан Дж. Принципы теории твердого тела. М.: Мир, 1974.
3. Киреев П.С. Физика полупроводников. М.: Высш. шк., 1975.
4. Шалимова К.В. Физика полупроводников. М.: Энергоатомиздат, 1985.
5. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. М.: Мир, 1984.
6. Мотт Н., Мотт Э. Электронные процессы в некристаллических веществах. М.: Мир, 1974.
7. Мотт Ю.И. Оптические свойства полупроводников. М.: Наука, 1977.