

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королева»

УТВЕРЖДЕНА

Решением научно-технического совета
протокол № 1 от «24» января 2022 г.

Председатель НТС, первый проректор -
проректор по научно-исследовательской
работе  А.Б. Прокофьев

Ученый секретарь НТС
 Л.В. Родионов

**ПРОГРАММА
КАНДИДАТСКОГО ЭКЗАМЕНА**

по научной специальности

1.3.11 Физика полупроводников

Химическая связь и атомная структура полупроводников

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

Основы технологии полупроводников и методы определения их параметров

1. **Методы получения объемных кристаллов.** Выращивания объемных монокристаллов из жидкой фазы. Выращивания объемных монокристаллов газовой фазы.
2. **Методы выращивания эпитаксиальных пленок.** Эпитаксия из жидкой и газовой фазы. Молекулярно-лучевая эпитаксия. Металлоорганическая эпитаксия.
3. **Методы легирования полупроводников.** Легирование в процессе роста монокристаллов и эпитаксиальных структур. Ионная имплантация. Радиационное (нейтронно-трансмутационное) легирование. Термодиффузия.

4. Основные методы определения параметров полупроводников. Определение ширины запрещенной зоны, подвижности и концентрации свободных носителей заряда. Определение времени жизни неосновных носителей заряда. Определение концентрации и глубины залегания уровней примесей и дефектов.

Основы зонной теории полупроводников

1. Основные приближения зонной теории. Волновая функция электрона в периодическом поле кристалла. Теорема Блоха. Зона Бриллюэна. Энергетические зоны.

2. Законы дисперсии для важнейших полупроводников. Изоэнергетические поверхности. Тензор обратной эффективной массы. Плотность состояний. Особенности Ван-Хова.

3. 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.

4. Уровни энергии, создаваемые примесями и дефектами. Уровни энергии, создаваемые примесными центрами в полупроводниках. Доноры и акцепторы. Мелкие и глубокие уровни. Водородоподобные примесные центры.

Равновесная статистика электронов и дырок в полупроводниках

1. Функция распределения электронов. Концентрация электронов и дырок в зонах, эффективная плотность состояний. Невырожденный и

вырожденный электронный (дырочный) газ. Концентрации электронов и дырок на локальных уровнях. Факторы вырождения примесных состояний.

2. **Уровень Ферми.** Положение уровня Ферми и равновесная концентрация электронов и дырок в собственных полупроводниках. Положение уровня Ферми в примесных (некомпенсированных и компенсированных) полупроводниках. Многозарядные примесные центры.

Кинетические явления в полупроводниках

1. **Кинетическая теория.** Кинетическое уравнение. Кинетические коэффициенты и функция распределения. Термодинамическое равновесие. Интеграл столкновений.

2. **Носители заряда в слабых электрическом магнитном и температурном полях.** Проводимость, постоянная Холла и термо-ЭДС. Дрейфовая скорость, дрейфовая и холловская подвижности, фактор Холла. Дрейфовый и диффузионный ток. Соотношение Эйнштейна.

3. **Механизмы рассеяния носителей заряда в неидеальной решетке.** Взаимодействие носителей заряда с акустическими и оптическими фононами. Рассеяние носителей заряда на заряженных и нейтральных примесях.

4. **Носители заряда в сильном электрическом поле.** Горячие электроны. Отрицательная дифференциальная проводимость. Электрические неустойчивости; электрические домены и токовые шнуры.

Рекомбинация электронов и дырок в полупроводниках

1. **Генерация и рекомбинация неравновесных носителей заряда.** Квазиравновесие, квазиуровни Ферми. Уравнение кинетики рекомбинации. Времена жизни. Фотопроводимость.

2. **Механизмы рекомбинации.** Излучательная и безызлучательная рекомбинация. Межзонная рекомбинация. Рекомбинация через уровни примесей и дефектов. Центры прилипания. Оже-рекомбинация.

3. **Пространственно неоднородные неравновесные распределения носителей заряда.** Амбиполярная диффузия. Эффект Дембера. Длина диффузии неравновесных носителей заряда.

Контактные явления в полупроводниках

1. **Контакт металл – полупроводник.** Схема энергетических зон в контакте металл-полупроводник. Обогащенные, обедненные и инверсионные слои пространственного заряда вблизи контакта. Вольтамперная характеристика барьера Шоттки.

2. **Электронно-дырочный переход.** Энергетическая диаграмма p-n перехода. Инжекция неосновных носителей заряда в p-n переходе.

3. **Гетеропереходы.** Виды гетеропереходов. Энергетические диаграммы гетеропереходов. Вольтамперные характеристики гетеропереходов. Варизонные полупроводники.

Свойства поверхности полупроводников

1. **Поверхностные состояния и поверхностные зоны.** Таммовские уровни. Искривление зон, распределение заряда и потенциала вблизи поверхности.

2. **Эффект поля.** Влияние поверхностного потенциала на электропроводность. Методы исследования поверхностных состояний.

3. **Поверхностная рекомбинация.** Скорость поверхностной рекомбинации. Зависимость поверхностной рекомбинации от поверхностного потенциала.

Оптические явления в полупроводниках

1. **Оптические параметры полупроводников.** Комплексная диэлектрическая проницаемость, показатель преломления, коэффициент отражения, коэффициент поглощения. Связь между ними и соотношения Крамерса-Кронига.

2. **Межзонные переходы.** Край собственного поглощения в случае прямых и непрямых, разрешенных и запрещенных переходов. Экситонное поглощение и излучение. Спонтанное и вынужденное излучение.

3. **Взаимодействие света со свободными носителями заряда.** Поглощение света на свободных носителях заряда. Спектры отражения. Спектры поглощения.

4. **Взаимодействие света с кристаллической решеткой.** Поглощение света на колебаниях решетки. Рассеяние света колебаниями решетки, комбинационное рассеяние на оптических фононах (Рамана – Ландсберга), рассеяние на акустических фононах (Бриллюэна – Манделъштама).

5. **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.

6. **Оптические явления во внешних полях.** Эффект Франца-Келдыша. Эффект Погкельса. Эффект Бурштейна-Мосса. Эффекты Фарадея и Фойгта.

Фотоэлектрические явления

1. **Фотопроводимость.** Примесная и собственная фотопроводимость. Влияние прилипания неравновесных носителей заряда на фотопроводимость.

2. **Фотоэдс.** Фотоэдс в однородных полупроводниках. Объемная фотоэдс. Вентильная фотоэдс. Поверхностная фотоэдс.

3. **Фотоэлектромагнитный эффект.** Фотоэлектромагнитная эдс. Использование фотоэлектромагнитного эффекта для исследования параметров полупроводников.

Некристаллические полупроводники

1. **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.

2. **Механизмы переноса носителей заряда.** Прыжковая проводимость. Закон Мотта. Нестационарные процессы. Определение дрейфовой подвижности по измерениям времени пролета. Дисперсионный перенос.

3. **Оптические свойства.** Спектры оптического поглощения некристаллических материалов. Правило Урбаха.

Полупроводниковые структуры пониженной размерности и сверхрешетки

1. **Структуры пониженной размерности.** 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.

2. Оптические свойства структур пониженной размерности. 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.

3. Структуры пониженной размерности в электрическом и магнитном полях. Электрические и гальваномагнитные явления в двумерных структурах. Эффект Шубникова-де Гааза. Общее представление о квантовом эффекте Холла.

Принципы действия полупроводниковых приборов

1. Приборы с использованием р-п переходов. Вольтамперная характеристика р-п перехода. Выпрямительный диод. Туннельный диод. Диод Ганна. Биполярный транзистор. Тиристор.

2. Приборы на основе эффекта поля. Энергетическая диаграмма структуры металл-диэлектрик-полупроводник (МДП). Полевые транзисторы на МДП-структурах. Приборы с зарядовой связью.

3. Шумы в полупроводниковых приборах. Тепловые шумы. Дробовой шум. Избыточные шумы. Коэффициент шума.

4. Оптоэлектронные приборы. 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.

5. 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.

Рекомендуемая основная литература

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