

**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**  
**Федеральное государственное бюджетное образовательное**  
**учреждение высшего образования**  
**«Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова»**

Базовая кафедра нанотехнологий в электронике  
ФГБОУ ВО "ЯрГУ им. П.Г. Демидова" в ЯФ ФТИАН РАН

**УТВЕРЖДАЮ**

Декан физического факультета  
  
И.С. Огнев  
(подпись)

23 мая 2023 года

**Рабочая программа дисциплины**

«Специальная дисциплина в соответствии с темой диссертации  
на соискание ученой степени кандидата наук»

программы подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре  
по научной специальности 1.3.11 Физика полупроводников

Форма обучения очная

Программа одобрена на заседании  
Базовой кафедры нанотехнологий в электронике  
ФГБОУ ВО "ЯрГУ им. П.Г. Демидова" в ЯФ ФТИАН РАН  
от «30» марта 2023 года, протокол № 8

Ярославль

### **1. Цели освоения дисциплины**

Целями освоения дисциплины «Физика полупроводников» являются: получение фундаментальных знаний в области физики полупроводников; представлений о химических связях и атомно-кристаллической структуре полупроводников, физических свойствах (электронных, магнитных, оптических и др.) проводниковых материалов; о взаимосвязи между атомно-электронной структурой, составом и различными физическими свойствами материалов, применяемых в области электроники; о физических принципах работы полупроводниковых приборов и методах получения полупроводниковых структур; формирование навыков экспериментального изучения физических параметров полупроводниковых систем.

### **2. Место дисциплины в структуре программы аспирантуры**

Данная дисциплина является обязательной для освоения и направлена на подготовку к сдаче кандидатского экзамена по специальной дисциплине в соответствии с темой диссертации на соискание ученой степени кандидата наук по научной специальности 1.3.11 Физика полупроводников по отрасли наук: физико-математические.

### **3. Планируемые результаты освоения дисциплины: -**

Физика полупроводников – область фундаментальной и прикладной науки и техники, включающая экспериментальные и теоретические исследования физических свойств полупроводниковых материалов и композитных структур на их основе (включая гетероструктуры, МОП структуры и барьеры Шоттки), а также происходящих в них физических явлений, разработку и исследование технологических процессов получения полупроводниковых материалов и композитных структур на их основе, создание оригинальных полупроводниковых приборов и интегральных устройств. Значение научных и технических проблем для народного хозяйства, решаемых в рамках специальности, состоит в развитии физических принципов работы, технологий изготовления и реализации электронных и оптоэлектронных полупроводниковых приборов и интегральных устройств, используемых практически во всех областях человеческой деятельности.

### **В результате освоения дисциплины аспирант должен:**

#### **Знать:**

- основные понятия, связанные с физикой полупроводников, процессами переноса носителей заряда в полупроводниковых системах, с основными явлениями в моно- и гетеросистемах, полупроводниковых системах пониженной размерности;
- основные эффекты возникающие в полупроводниковых системах под влиянием внешних воздействий, кинетические и квантово-механические подходы для расчета электрических параметров полупроводников и приборов на их основе.

#### **Уметь:**

- применять полученные знания для постановки и решения теоретических и экспериментальных задач в области физики полупроводников;
- использовать основные параметры полупроводниковых структур для получения элементов электроники с различными свойствами;
- анализировать и систематизировать научно-техническую информацию в области физики полупроводников, применять её для совершенствования подходов анализа и производства электроники;

#### **Владеть:**

- информацией об областях применения физики полупроводников и современной полупроводниковой технологии;
- практическими навыками работы с современными методами исследования параметров устройств микро- и нанoeлектроники;
- современными компьютерными средствами автоматизации и анализа и экспериментальных данных, приемами математического моделирования для решения теоретических задач в области физики полупроводников.

#### 4. Объем, структура и содержание дисциплины

Общая трудоемкость дисциплины составляет 6 зачетных единиц, 216 акад. часов.

№ п/п	Темы (разделы) дисциплины, их содержание	Семестр	Виды учебных занятий и их трудоемкость (в академических часах)					Формы текущего контроля успеваемости
			лекции	практические	лабораторные	консультации	самостоятельная работа	Форма промежуточной аттестации
1	Введение. Предмет, цели и задачи курса. Силы связи в твердых телах и атомная структура полупроводников.	4	1				12	Реферат
2	Основы зонной теории полупроводников.	4	3	3			12	Реферат
3	Равновесная статистика электронов и дырок в полупроводниках. Рекомбинация электронов и дырок в полупроводниках. Кинетические явления в полупроводниках	4	4	5			29	Реферат
4	Контактные явления в полупроводниках. Свойства поверхности полупроводников. Принципы действия полупроводниковых приборов.	4	4	4			29	Реферат
	<b>Всего за 4 семестр</b>	<b>108 час.</b>	<b>12</b>	<b>12</b>		<b>2</b>	<b>82</b>	
5	Оптические и фотоэлектрические явления в полупроводниках.	5	4	4			22	Реферат
6	Некристаллические полупроводники.	5	5	4			22	Реферат

№ п/п	Темы (разделы) дисциплины, их содержание	Семестр	Виды учебных занятий и их трудоемкость (в академических часах)					Формы текущего контроля успеваемости
	Полупроводниковые структуры пониженной размерности и сверхрешетки.							
7	Основы технологии полупроводников и методы определения их параметров.	5	3	4		2	20	Реферат
							18	Кандидатский экзамен
	<b>Всего за 5 семестр 108 час.</b>		<b>12</b>	<b>12</b>		<b>2</b>	<b>82</b>	
	<b>Всего 216 час.</b>		<b>24</b>	<b>24</b>		<b>4</b>	<b>164</b>	

### Содержание разделов дисциплины:

#### 1. Химическая связь и атомная структура полупроводников

Предмет, цели и задачи курса. Основная терминология. 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 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. Изознергетические 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.

### **3. Равновесная статистика электронов и дырок в полупроводниках. Кинетические явления в полупроводниках. Рекомбинация электронов и дырок в полупроводниках**

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.

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

Кинетические коэффициенты – проводимость, постоянная Холла и термо-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.

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.

### **4. Контактные явления в полупроводниках. Принципы действия полупроводниковых приборов. Свойства поверхности полупроводников**

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.

Вольтамперная характеристика  $p$ - $n$  перехода. Приборы с использованием  $p$ - $n$  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

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

## **5. Оптические и фотоэлектрические 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 Покейльса. Эффект Бурштейна-Мосса. Эффекты Фарадея и Фойгта.

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.

## **6. Некристаллические полупроводники. Полупроводниковые структуры пониженной размерности и сверхрешетки**

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.

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.

## **7. 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.

## **5. Образовательные технологии, в том числе технологии электронного обучения и дистанционные образовательные технологии, используемые при осуществлении образовательного процесса по дисциплине**

В процессе обучения используются следующие образовательные технологии:

**Вводная лекция** – дает первое целостное представление о дисциплине и ориентирует студента в системе изучения данной дисциплины. Дается краткий обзор курса, история развития науки и практики, достижения в этой сфере, имена известных ученых, излагаются перспективные направления исследований. На этой лекции высказываются методические и организационные особенности работы в рамках данной дисциплины, а также дается анализ рекомендуемой литературы.

**Академическая лекция с элементами лекции-беседы** – последовательное изложение материала, осуществляемое преимущественно в виде монолога преподавателя. Элементы лекции-беседы обеспечивают контакт преподавателя с аудиторией, что позволяет привлекать внимание аспирантов к наиболее важным темам дисциплины, активно вовлекать их в учебный процесс, контролировать темп изложения учебного материала в зависимости от уровня его восприятия.

**Практическое занятие** – занятие, посвященное освоению конкретных умений и навыков по закреплению полученных на лекции знаний.

**Консультации** – вид учебных занятий, являющийся одной из форм контроля самостоятельной работы аспирантов. На консультациях по просьбе аспирантов рассматриваются наиболее сложные разделы дисциплины, преподаватель отвечает на вопросы аспирантов, которые возникают у них в процессе самостоятельной работы.

В процессе обучения используются следующие технологии электронного обучения и дистанционные образовательные технологии:

**Электронный учебный курс «Теоретическая физика» в LMS Электронный университет Moodle ЯрГУ**, в котором:

- представлены задания для самостоятельной работы аспирантов по темам дисциплины;
- представлен список литературы, рекомендуемой для освоения дисциплины;
- представлена информация о форме и времени проведения консультаций по дисциплине в случае их проведения в дистанционном формате в режиме онлайн.

**6. Перечень основной и дополнительной литературы, ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет» (при необходимости), рекомендуемых для освоения дисциплины**

**а) основная литература**

1. Бонч-Бруевич В.Л., Калашников С.Г. Физика полупроводников. М.: Наука, 1977.  
[http://lib.uniyar.ac.ru/opac/bk\\_cat\\_card.php?rec\\_id=746113&cat\\_cd=YARSU](http://lib.uniyar.ac.ru/opac/bk_cat_card.php?rec_id=746113&cat_cd=YARSU)
2. Шалимова К.В. Физика полупроводников. М.: Энергоатомиздат, 1985.  
[http://lib.uniyar.ac.ru/opac/bk\\_cat\\_card.php?rec\\_id=765225&cat\\_cd=YARSU](http://lib.uniyar.ac.ru/opac/bk_cat_card.php?rec_id=765225&cat_cd=YARSU)
3. Займан Дж. Принципы теории твердого тела. М.: Мир, 1974  
[http://lib.uniyar.ac.ru/opac/bk\\_cat\\_card.php?rec\\_id=748933&cat\\_cd=YARSU](http://lib.uniyar.ac.ru/opac/bk_cat_card.php?rec_id=748933&cat_cd=YARSU)
4. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. М.: Мир, 1984  
[http://lib.uniyar.ac.ru/opac/bk\\_cat\\_card.php?rec\\_id=2140454&cat\\_cd=YARSU](http://lib.uniyar.ac.ru/opac/bk_cat_card.php?rec_id=2140454&cat_cd=YARSU)
5. Киреев П.С. Физика полупроводников. М.: Высш. шк., 1975.  
[http://lib.uniyar.ac.ru/opac/bk\\_cat\\_card.php?rec\\_id=765993&cat\\_cd=YARSU](http://lib.uniyar.ac.ru/opac/bk_cat_card.php?rec_id=765993&cat_cd=YARSU)
6. Мотт Н., Мотт Э. Электронные процессы в некристаллических веществах. М.: Мир, 1974.  
[http://lib.uniyar.ac.ru/opac/bk\\_cat\\_card.php?rec\\_id=765993&cat\\_cd=YARSU](http://lib.uniyar.ac.ru/opac/bk_cat_card.php?rec_id=765993&cat_cd=YARSU)

**б) дополнительная литература**

1. Павлов П.В., Хохлов А.Ф. Физика твердого тела. -М.: Высшая школа, 2000.  
[http://lib.uniyar.ac.ru/opac/bk\\_cat\\_card.php?rec\\_id=280147&cat\\_cd=YARSU](http://lib.uniyar.ac.ru/opac/bk_cat_card.php?rec_id=280147&cat_cd=YARSU)
2. Гаман В. И. Физика полупроводниковых приборов: учеб.пособие. / В. И.Гаман; М-во образования РФ - Томск: Изд-во НТЛ, 2000. - 425с.  
[http://lib.uniyar.ac.ru/opac/bk\\_cat\\_card.php?rec\\_id=285497&cat\\_cd=YARSU](http://lib.uniyar.ac.ru/opac/bk_cat_card.php?rec_id=285497&cat_cd=YARSU)
3. Ансельм А.И. Введение в теорию полупроводников. / Ансельм А.И. - М.: ГРФМЛ. Наука. – 1978. - 615 с.  
[http://lib.uniyar.ac.ru/opac/bk\\_cat\\_card.php?rec\\_id=736555&cat\\_cd=YARSU](http://lib.uniyar.ac.ru/opac/bk_cat_card.php?rec_id=736555&cat_cd=YARSU)
4. Антоненко С.В. Технология тонких пленок. / С.В. Антоненко - Москва: МИФИ, 2008. - 104 с.  
[http://lib.uniyar.ac.ru/opac/bk\\_cat\\_card.php?rec\\_id=1679215&cat\\_cd=BIBLCLUB](http://lib.uniyar.ac.ru/opac/bk_cat_card.php?rec_id=1679215&cat_cd=BIBLCLUB)
5. Викулин И.М., Стафеев В.И. Физика полупроводниковых приборов. М.: Радио и связь, 1990.  
[http://lib.uniyar.ac.ru/opac/bk\\_cat\\_card.php?rec\\_id=2138035&cat\\_cd=YARSU](http://lib.uniyar.ac.ru/opac/bk_cat_card.php?rec_id=2138035&cat_cd=YARSU)
6. Зеегер К. Физика полупроводников. М.: Мир. 1977. 615 с

**в) ресурсы сети «Интернет» (при необходимости)**

Автоматизированная библиотечно-информационная система «БУКИ-NEXT»  
[http://www.lib.uniyar.ac.ru/opac/bk\\_cat\\_find.php](http://www.lib.uniyar.ac.ru/opac/bk_cat_find.php)

**7. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине**

Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине включает в свой состав следующие помещения:

- учебные аудитории для проведения лекций;
- учебные аудитории для проведения практических занятий;
- учебные аудитории для проведения групповых и индивидуальных консультаций,
- учебные аудитории для проведения промежуточной аттестации;
- помещения для самостоятельной работы.



Помещения для самостоятельной работы оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети «Интернет» и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду ЯрГУ.

Автор(ы) :

Заведующий Базовой кафедрой нанотехнологий в электронике  
ФГБОУ ВО "ЯрГУ им. П.Г. Демидова" в ЯФ ФТИАН РАН  
в ЯФ ФТИАН РАН

А.С. Рудый

**Приложение №1 к рабочей программе дисциплины**  
**«Специальная дисциплина в соответствии с темой диссертации**  
**на соискание ученой степени кандидата наук»**  
**по научной специальности 1.3.11 Физика полупроводников**

**Оценочные материалы**  
**для проведения текущей и/или промежуточной аттестации**  
**аспирантов по дисциплине**

**1. Контрольные задания и (или) иные материалы,**  
**используемые в процессе текущего контроля успеваемости**

**Темы рефератов по разделам дисциплины**

1. Точечные, линейные и двумерные дефекты.
2. Методы легирования полупроводников
3. Определение эффективных масс из циклотронного (диаманитного) резонанса.
4. Положение уровня Ферми и равновесная концентрация электронов и дырок в собственных и примесных (некомпенсированных и компенсированных) полупроводниках.
5. Дрейфовая скорость, дрейфовая и холловская подвижности, фактор Холла
6. Механизмы рекомбинации.
7. Энергетическая диаграмма  $p$ - $n$  перехода
8. Поверхностные состояния и поверхностные зоны. Искривление зон, распределение заряда и потенциала вблизи поверхности.
9. Межзонные переходы. Край собственного поглощения в случае прямых и не прямых, разрешенных и запрещенных переходов.
10. Фотоэлектромагнитный эффект.
11. Прыжковая проводимость. Закон Мотта.
12. Квантовые нити. Квантовые точки. Энергетический спектр электронов и плотность состояний в этих системах.
13. Энергетическая диаграмма структуры металл-диэлектрик-полупроводник (МДП). Полевые транзисторы на МДП-структурах.

**2. Список вопросов и (или) заданий для проведения промежуточной аттестации**

Кандидатский экзамен по специальной дисциплине проводится устно по экзаменационным билетам.

Каждый экзаменационный билет содержит три вопроса.

На подготовку к ответу дается от 60 до 120 минут.

**Список вопросов к экзамену:**

1. Химическая связь и атомная структура полупроводников. Электронная конфигурация внешних оболочек атомов и типы сил связи в твердых телах.
2. Ван-дер-ваальсова, ионная и ковалентная связь.
3. Структуры важнейших полупроводников – элементов  $A^{IV}$ ,  $A^{VI}$  и соединений типов  $A^{III}B^V$ ,  $A^{II}B^{VI}$ ,  $A^{IV}B^{VI}$ .

4. 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.
5. Примеси и структурные дефекты в кристаллических и аморфных полупроводниках. Химическая природа и электронные свойства примесей. Точечные, линейные и двумерные дефекты.
6. Методы выращивания объемных монокристаллов из жидкой и газовой фаз. Методы выращивания эпитаксиальных пленок (эпитаксия из жидкой и газовой фазы). Молекулярно-лучевая эпитаксия. Металлорганическая эпитаксия.
7. Методы легирования полупроводников.
8. 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.
9. Основные приближения зонной теории. Волновая функция электрона в периодическом поле кристалла. Теорема Блоха. Зона Бриллюэна. Энергетические зоны.
10. Законы дисперсии для важнейших полупроводников.
11. Изоэнергетические поверхности. Тензор обратной эффективной массы. Плотность состояний. Особенности Ван-Хова.
12. Уравнения движения электронов и дырок во внешних полях. Метод эффективной массы. Искривление энергетических зон в электрическом поле. Движение электронов и дырок в магнитном поле.
13. Определение эффективных масс из циклотронного (диамагнитного) резонанса.
14. Связь зонной структуры с оптическими свойствами полупроводника. Уровни энергии, создаваемые примесными центрами в полупроводниках. Доноры и акцепторы. Мелкие и глубокие уровни. Водородоподобные примесные центры.
15. Равновесная статистика электронов и дырок в полупроводниках. Функция распределения электронов.
16. Концентрация электронов и дырок в зонах, эффективная плотность состояний.
17. Невырожденный и вырожденный электронный (дырочный) газ. Концентрации электронов и дырок на локальных уровнях. Факторы вырождения примесных состояний.
18. Положение уровня Ферми и равновесная концентрация электронов и дырок в собственных и примесных (некомпенсированных и компенсированных) полупроводниках. Многочарядные примесные центры.
19. Механизмы рассеяния носителей заряда в неидеальной решетке. Взаимодействие носителей заряда с акустическими и оптическими фононами. Рассеяние носителей заряда на заряженных и нейтральных примесях.
20. Рекомбинация электронов и дырок в полупроводниках. Генерация и рекомбинация неравновесных носителей заряда. Квазиравновесие, квазиуровни Ферми. Уравнение кинетики рекомбинации. Времена жизни. Фотопроводимость.
21. Механизмы рекомбинации. Излучательная и безызлучательная рекомбинация. Межзонная рекомбинация. Рекомбинация через уровни примесей и дефектов. Центры прилипания. Оже-рекомбинация.
22. Пространственно неоднородные неравновесные распределения носителей заряда. Амбиполярная диффузия. Эффект Дембера. Длина диффузии неравновесных носителей заряда.
23. 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.
24. 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).

25. 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.

26. 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.

27. 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.

28. Квантовые нити. Квантовые точки. Энергетический спектр электронов и плотность состояний в этих системах.

29. 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.

30. Квантовый эффект Холла.

## **2.1 Описание процедуры выставления оценки**

По итогам экзамена выставляется одна из оценок: «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» или «неудовлетворительно».

**Оценка «Отлично»** выставляется аспиранту, который демонстрирует глубокое и полное владение содержанием материала и понятийным аппаратом дисциплины; осуществляет межпредметные связи; умеет связывать теорию с практикой. Аспирант дает развернутые, полные и четкие ответы на вопросы экзаменационного билета и дополнительные вопросы, соблюдает логическую последовательность при изложении материала. Грамотно использует научную терминологию.

**Оценка «Хорошо»** выставляется аспиранту, ответ которого на экзамене в целом соответствуют указанным выше критериям, но отличается меньшей обстоятельностью, глубиной, обоснованностью и полнотой. В ответе имеют место отдельные неточности (несущественные ошибки), которые исправляются аспирантом после дополнительных и (или) уточняющих вопросов экзаменатора.

**Оценка «Удовлетворительно»** выставляется аспиранту, который дает недостаточно полные и последовательные ответы на вопросы экзаменационного билета и дополнительные вопросы, но при этом демонстрирует умение выделить существенные и несущественные признаки и установить причинно-следственные связи. При ответах аспирант допускает ошибки в определении и раскрытии отдельных понятий, формулировке положений, которые аспирант затрудняется исправить самостоятельно. При аргументации ответа аспирант не обосновывает свои суждения. На часть дополнительных вопросов студент затрудняется дать ответ или дает неверные ответы.

**Оценка «Неудовлетворительно»** выставляется аспиранту, который демонстрирует разрозненные, бессистемные знания; беспорядочно и неуверенно излагает материал; не умеет выделять главное и второстепенное, не умеет соединять теоретические положения с практикой, не устанавливает межпредметные связи; допускает грубые ошибки при определении сущности раскрываемых понятий, явлений, вследствие непонимания их существенных и несущественных признаков и связей; дает неполные ответы, логика и последовательность изложения которых имеют существенные и принципиальные нарушения, в ответах отсутствуют выводы. Дополнительные и уточняющие вопросы экзаменатора не приводят к коррекции ответов аспиранта.

**Оценка «Неудовлетворительно»** выставляется также аспиранту, который взял экзаменационный билет, но отвечать отказался.