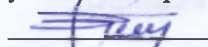




МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
**«Институт автоматки и процессов управления  
Дальневосточного отделения Российской академии наук»  
(ИАПУ ДВО РАН)**


**«СОГЛАСОВАНО»**

Зам. директора по научно-  
образовательной деятельности,  
ученый секретарь, к.т.н.

 С.Б. Змеу  
«22» марта 2022 г.

**«УТВЕРЖДАЮ»**

Директор ИАПУ ДВО РАН  
член-корреспондент РАН

 Р.В. Ромашко  
«22» марта 2022 г.



**ПРОГРАММА ВСТУПИТЕЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ**

по специальной дисциплине

Научная специальность – 1.3.11 Физика полупроводников

Форма подготовки (очная)

Междисциплинарная кафедра подготовки кадров высшей квалификации (МК ПКВК)

Программа вступительных испытаний составлена на основе федерального государственного образовательного стандарта высшего образования (уровень подготовки по программам специалитета и магистратуры).

Программа вступительных испытаний обсуждена на заседании МК ПКВК, протокол № 2 от «14» марта 2022 г.

Заведующий кафедрой: д-р физ.- мат. наук, профессор Н.Г. Галкин

Составители: чл.-корр. РАН А.А. Саранин, д.ф.-м.н., профессор Н.Г. Галкин

## **АННОТАЦИЯ**

Программа вступительных испытаний предназначена для поступающих на образовательную программу высшего образования - программу подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре по научной специальности 1.3.11 Физика полупроводников.

Цель вступительных испытаний - выявление среди поступающих в аспирантуру наиболее способных и подготовленных к освоению образовательных программ высшего образования - программ подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре.

Вступительные испытания проводятся в форме устного экзамена.

Особенность построения программы связана с тем, что фактически подготовка аспирантов проходит в двух направлениях: теория магнетизма наноструктурированных систем и экспериментальное исследование электрических и магнитных свойств наноструктур. Этим и обусловлен перечень вопросов, вынесенных на вступительный экзамен.

Программа вступительных испытаний включает в себя:

- аннотацию;
- требования к поступающим;
- содержание вступительных испытаний;
- вопросы к экзамену;
- список рекомендуемой литературы и источников.

### **I. ТРЕБОВАНИЯ К ПОСТУПАЮЩИМ**

Поступающий в аспирантуру должен продемонстрировать знания и умения по физике полупроводников, соответствующие предшествующему уровню подготовки. Иметь определенный научный задел по данному направлению подготовки, который будет учтен при участии в конкурсе, в случае одинакового количества баллов поступающих.

## **II. СОДЕРЖАНИЕ ВСТУПИТЕЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ**

### **МОДУЛЬ 1. СТРУКТУРА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И СВОЙСТВА**

#### **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 AIV, AVI и соединений типов AIIIBV, AIIIVI, AIVBVI.

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. 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.

## **МОДУЛЬ 2. СТАТИСТИКА НОСИТЕЛЕЙ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ И ИХ КИНЕТИКА**

### **1. Равновесная статистика 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.

### **2. Кинетические явления в полупроводниках**

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.

### **3. 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.

## **МОДУЛЬ 3. КОНТАКТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ**

### **1. 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.

### **2. 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.

## **МОДУЛЬ 4. ОПТИЧЕСКИЕ И ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВ**

### **1. 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 Поккельса.

Эффект Бурштейна-Мосса.

Эффекты Фарадея и Фойгта.

### **2. 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.

## **МОДУЛЬ 5. ФИЗИКА ПОВЕРХНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ**

### **Раздел 1. Поверхности твердых тел и поверхностных фазы**

1. Типы поверхностных кристаллических решеток
2. Поверхностная диффузия. Диффузионные константы и их определение.
3. Общие представления об адсорбции.
4. Гомо- и гетероэпитаксия.
5. Типы поверхностных дефектов.

### **Раздел 2. Современные методы исследования поверхности полупроводников**

1. Представления о высоком и сверхвысоком вакууме.
2. Современные методы исследования поверхности твердого тела и их классификация.
3. Физические основы ЭОС. Анализ состава поверхности твердого тела методом ЭОС. Послойный анализ с применением метода ЭОС.
4. Фотоэлектронная эмиссия. Источники фотонов. Спектры РФЭС для анализа состава поверхности. Изучение наружной энергетической полосы проводников методом РФЭС. РФЭС - как спектроскопия для анализа состава поверхности.
5. Физические основы метода спектроскопии ХПЭ. Плазмоны. Спектроскопия ХПЭ для анализа поверхности.
6. Определение структуры поверхности методами ДМЭ.
7. Физические основы метода ДОБЭ. Применение метода ДОБЭ для изучения эпитаксиального роста полупроводников и других процессов на многослойных поверхностях.
8. УФЭС как метод исследования электронной структуры твердых тел.
9. Физические основы метода СТМ. Концепция сканирования. СВВ установка для сканирующей туннельной микроскопии OMICRONMULTIPROBE. Применение метода СТМ для анализа структуры поверхности твердого тела и поверхностных фаз.



## РЕКОМЕНДУЕМАЯ 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.

## III. ВОПРОСЫ К ВСТУПИТЕЛЬНОМУ ИСПЫТАНИЮ

1. Электронная и дырочная проводимость в полупроводниках.
2. А) Классическое представление.
3. Б) Квантово-механическое представление.
4. Примеси донорные и акцепторные, определения, примеры, задачи.
5. А) Как создать проводимость р или n-типа в Si, Ge.
6. Б) Как создать проводимость р или n-типа в соединении элементов третьей и пятой группы. В) Как создать проводимость р или n-типа в соединении элементов второй и шестой группы.
7. Г) Роль примеси Si (Ge) в соединении элементов третьей и пятой группы.
8. Д) Примесные уровни. Общие свойства донорных и акцепторных уровней. Отличие донорных и акцепторных уровней при  $T=0K$ .
9. Е) Компенсация примесей, полная и частичная компенсация примесей.
10. Ж) Произведение концентраций основных и неосновных носителей (закон действующих масс).

11. Что такое подвижность носителей заряда? Определение. Размерность. Величина подвижности в собственном, примесном, компенсированном полупроводнике (у кого подвижность больше и почему). Сравнить подвижность электронов и дырок.
12. Зависимость концентрации носителей заряда от температуры в собственном полупроводнике. Формула, график, объяснение. Зависимость концентрации электронов от температуры в полупроводнике n-типа. Формула, график, объяснение.
13. Назвать основные классы полупроводников. Примеры, назвать 3-4 материала в каждом классе (моноатомные, бинарные соединения).
14. Типы химической связи в полупроводниках. Примеры (3-4 материала) на каждый тип связи.
15. Зависимость ширины запрещенной зоны от типа химической связи. Примеры изоэлектронного ряда полупроводников (строка в таблице Менделеева). Задачи.
16. Зависимость ширины запрещенной зоны от порядкового номера  $Z$  элемента, входящего в состав полупроводников (столбец в таблице Менделеева). Задачи.
17. Диффузия носителей заряда в полупроводнике. Определение. Диффузионный ток дырок, одномерный и трехмерный случай. Диффузионный ток электронов. Диффузионная длина. Время жизни.
18. Дрейф носителей заряда. Определение. Подвижность. Дрейфовый ток дырок, электронов.
19. Полный ток в полупроводнике (формула).
20. Уравнение непрерывности для дырок, для электронов. Одномерный и трехмерный случаи. Стационарное состояние.
21. Волновые свойства микрочастиц. Гипотеза де Бройля. Экспериментальные доказательства волновых свойств частиц.
22. Состояния электрона в кристалле. Волновой вектор. Правила его квантования. Условие Борна-Кармана.
23. Приближение сильной связи. Образование энергетических зон в кристалле. Число уровней. Ширина зоны. Вырожденные и гибридные зоны.
24. Зависимость  $E(k)$  для простой кубической решетки. Общие свойства функции  $E(k)$ . Период функции  $E(k)$ . Зоны Бриллюэна.
25. Эффективная масса электронов и дырок. Зависимость энергии электрона от квазиимпульса вблизи краев зон.
26. Водородоподобная модель примесного центра.
27. Функции Ферми-Дирака. Уровень Ферми.
28. Плотность состояний в свободной и валентной зонах.

29. Концентрация электронов и дырок в полупроводнике, общий случай (вывод формулы).
30. Невырожденный полупроводник. Вырожденный полупроводник. Положение уровня Ферми, формулы для Концентрации носителей заряда.
31. Собственный невырожденный полупроводник. Зависимость уровня Ферми и концентрации носителей от температуры. Собственный вырожденный полупроводник.
32. Невырожденный полупроводник N-типа. Случай низких температур.
33. Невырожденный полупроводник N-типа. Случай высокой температур.
34. Зависимость концентрации электронов и уровня Ферми от температуры в полупроводнике N-типа в широком диапазоне температур.
35. Зависимость концентрации дырок и уровня Ферми от температуры в полупроводнике P-типа в широком диапазоне температур.
36. Концентрация неосновных носителей в полупроводнике. Закон «действующих масс» для невырожденного полупроводника.
37. Контактная разность потенциалов. Ее происхождение, величина, способ измерения.
38. Двойной заряженный слой на контакте двух кристаллов. Толщина заряженных слоев в металле и в полупроводнике (оценка).
39. Контакт металла и полупроводника N-типа, два случая. Проводимость приконтактного слоя полупроводника.
40. Контакт металла и полупроводника P-типа, два случая. Запорный и антизапорный слой.
41. Электрическое поле в P-N переходе. Зависимость напряженности и потенциала от координаты. Изгиб энергетических уровней свободной и валентной зон.
42. Толщина заряженных слоев в P-N переходе. Толщина P-N перехода.
43. Гетеропереход. Зонная диаграмма. Основное отличие гетероперехода от гомоперехода.
44. Молекулярно-лучевая и твердофазная эпитаксия.
45. Представления о поверхности твердых тел и поверхностных фазах.
46. Типы поверхностных кристаллических решеток
47. Поверхностная диффузия.
48. Диффузионные константы и их определение.
49. Общие представления об адсорбции.
50. Гомо- и гетероэпитаксия.
51. Типы поверхностных дефектов.

52. Представления о высоком и сверхвысоком вакууме.
53. Современные методы исследования поверхности твердого тела и их классификация.
54. Физические основы ЭОС. Анализ состава поверхности твердого тела методом ЭОС. Послойный анализ с применением метода ЭОС.
55. Фотоэлектронная эмиссия. Источники фотонов. Спектры РФЭС для анализа состава поверхности. РФЭС - как спектроскопия для анализа состава поверхности.
56. Физические основы метода спектроскопии ХПЭ. Плазмоны. Спектроскопия ХПЭ для анализа поверхности.
57. Определение структуры поверхности методами ДМЭ.
58. Физические основы метода ДОБЭ. Применение метода ДОБЭ для изучения эпитаксиального роста полупроводников и других процессов на многослойных поверхностях.
59. УФЭС как метод исследования электронной структуры твердых тел.
60. Физические основы метода СТМ. Концепция сканирования. СВВ установка для сканирующей туннельной микроскопии OMICRON MULTIPROBE. Применение метода СТМ для анализа структуры поверхности твердого тела и поверхностных фаз.

#### **IV. СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ И ИСТОЧНИКОВ**

##### **Основная литература**

1. Яценко О.Б., Чудотворцев И.Г., Шаров М.К. Основы физики и химии полупроводников: Учебное пособие. Ч.2. - Воронеж: ИПЦ ВГУ, 2007. - 50 с. <http://window.edu.ru/resource/282/59282>
2. Плотников В.П. Физика проводников и диэлектриков. Учебное пособие. - Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2004. - 80 с.  
<http://window.edu.ru/resource/782/21782>

3. Бормонтов Е.Н., Хухрянский М.Ю. Статистика электронов и дырок в полупроводниках: Учебное пособие по лекционному курсу "Физика полупроводников". - Воронеж: Изд-во ВГУ, 2003. - 31 с.  
<http://window.edu.ru/resource/207/27207>
4. Старостин, В.В. Материалы и методы нанотехнологии [Электронный ресурс] : учебное пособие / Под общ. редакцией Л.Н. Патрикеева. - М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. - 431с.  
<http://window.edu.ru/resource/622/64622>
5. Дубровский, В.Г. Теоретические основы технологии полупроводниковых наноструктур [Электронный ресурс]: учебное пособие/ В.Г. Дубровский. - СПб.: СПбГПУ, 2006. - 347с.  
<http://window.edu.ru/resource/346/63346>
6. Боровик, Е.С. Лекции по магнетизму [Электронный ресурс]: учебное пособие/Е. С. Боровик, В.В. Еременко, А.С. – М.: МильнерФизматлит. 2005. - 511с.  
<http://www.iprbookshop.ru/17301>.

#### Дополнительная литература

1. Шалимова К.В. Физика полупроводников. М.: Энергоатомиздат., 1985, 391с.
2. Дитина З.З. «Лабораторные работы по физике полупроводников и низкоразмерных систем», учебно-методические пособие, издательство ДВГУ, 2006.
3. Бонч-Бруевич В.Л., Калашников С.Г. Физика полупроводников. М. Наука 1977, 672 с.
4. Киреев П.С. Физика полупроводников. М. Высшая школа 1975, 584 с.
5. Практикум по полупроводникам и полупроводниковым приборам. Под ред. Шалимовой К.В. М.: Энергоатомиздат, 1967, 483с.
6. Кучис Е.В. Методы исследования эффекта Холла. М.: Советское радио, 1974, 328с.

7. Павлов Л.П. Методы измерения параметров полупроводниковых материалов. М.: Высшая школа, 1987, 239с.
8. Бормонтон Е.Н., Быкадорова Г.В., Гаврилов А.Е. Моделирование зонной структуры полупроводников: Учебное пособие по лекционному курсу "Физика полупроводников". - Воронеж: Изд-во ВГУ, 2003. - 33 с.  
<http://window.edu.ru/resource/241/40241>