

Министерство науки и высшего образования РФ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе

/Д.С. Гуц/

«28» марта 2022 года

## **ПРОГРАММА**

**вступительного испытания для поступающих в аспирантуру**

### **2.2 Электроника, фотоника, приборостроение и связь**

*шифр и наименование группы научных специальностей*

### **2.2.2 Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники,**

#### **квантовых устройств**

*шифр и наименование научной специальности*

## Содержание программы

### **1 Физика полупроводников и полупроводниковых приборов**

#### ***1.1 Общие свойства полупроводников***

Структура кристаллов. Свойства основных монокристаллических материалов микроэлектроники: Si, GaAs и др. Поликристаллические и аморфные полупроводники.

#### ***1.2 Зонная теория твердого тела***

Энергетические спектры электронов в металлах, полупроводниках, диэлектриках. Зона проводимости и валентная зона. Электроны и дырки. Собственные и примесные полупроводники. Донорные и акцепторные примеси.

#### ***1.3 Основы статистической физики***

Функция распределения Ферми- Дирака. Концентрация электронов и дырок в зонах и их температурные зависимости. Распределение Максвелла-Больцмана.

#### ***1.4 Рекомбинация носителей заряда***

Теория рекомбинации Шокли-Рида. Диффузионная длина и время жизни носителей. Поверхностная рекомбинация.

#### ***1.5 Электропроводность полупроводников***

Носители заряда в слабом электрическом поле. Подвижность электронов и дырок. Диффузия и дрейф носителей заряда. Соотношение Эйнштейна. Уравнение для плотности электрического тока в полупроводниках. Уравнение непрерывности. Уравнение Пуассона. Носители заряда в сильном электрическом поле. Лавинное умножение в полупроводниках. Электрические домены и токовые шнуры. Эффект Ганна.

#### ***1.6 Основные свойства p-n переходов***

Электронно-дырочный (p-n) переход. Вольтамперная характеристика p-n-перехода. Токи носителей заряда в p-n переходе, квазиуровни Ферми. Генерация и рекомбинация носителей в p-n-переходе. Барьерная и диффузионная емкость. Пробой p-n-перехода: тепловой, лавинный, туннельный.

### ***1.7 Транзисторный эффект***

Зонная диаграмма полупроводниковой структуры с двумя близко расположенными  $p-n$ -переходами. Коэффициент инжекции. Коэффициент переноса носителей через базу. Коэффициент усиления транзистора.

### ***1.8 Контакт металл-полупроводник***

Теория Шоттки. Вольт-амперная характеристика. Омический контакт. Сопоставление с  $p-n$ -переходом.

### ***1.9 Структура металл-диэлектрик-полупроводник***

Зонная диаграмма и ее изменение при приложении напряжения. Роль поверхностных состояний, подвижных и неподвижных зарядов в диэлектрике.

### ***1.10 Гетероструктуры***

Зонная диаграмма гетеро-  $p-n$ -перехода. Коэффициент инжекции. Суперинжекция. Одинарные и двойные гетероструктуры. Варизонные структуры.

### ***1.11 Фотоэлектрические явления в полупроводниках***

Поглощение излучения: собственное и примесное, экситонное и на свободных носителях. Фото- проводимость. Спектральная характеристика. Фотовольтаический эффект в  $p-n$ -переходе.

### ***1.12 Термоэлектрические явления***

Термо- и гальваномагнитные эффекты. Эффект Холла. Электро-, магнито-, акустооптические эффекты.

## **2 Приборы твердотельной электроники и микроэлектроники**

### ***2.1 Полупроводниковые диоды***

Устройство и основные параметры. Выпрямительные и импульсные диоды. Варикапы. Стабилитроны и защитные диоды. Туннельные диоды. Диоды СВЧ: детекторные и смесительные, диоды Шоттки,  $pin$ -диоды, умножительные и параметрические, лавинно-пролетные, диоды Ганна.

### ***2.2 Биполярные транзисторы***

Принцип действия, основные параметры, их зависимость от температуры. Частотные и импульсные характеристики. Диффузионно-дрейфовые транзисторы.

### ***2.3 Тиристоры и их разновидности***

Структура. Принцип действия. Основные параметры.

### ***2.4 Полевые транзисторы,***

принцип действия, основные параметры. Полевые транзисторы с *p-n* переходом, с барьером Шоттки. МДП-транзисторы с индуцированным и встроенным каналами *p*- и *n*-типов.

### ***2.5 Полупроводниковые интегральные схемы***

Транзисторы, диоды и другие элементы в интегральном исполнении. Межэлементная изоляция. ИС, БИС, СБИС. Классификация микросхем по конструктивно-технологическому принципу: МОП- и КМОП-ИС, биполярные (ТТЛ-, ЭСЛ-, И<sup>2</sup>Л- ИС); Би-КМОП; «кремний-на-изоляторе» («кремний-на-сапфире»)-ИС; GaAs-ИС на полевых транзисторах с барьером Шоттки (ПТШ).

### ***2.6 Оптоэлектроника***

Фотоприемники: фото- резисторы, -диоды, -транзисторы, -матрицы. Основные параметры и характеристики. Фотоприемники ИК-диапазона, тепловизоры. Фоточувствительные приборы с зарядовой связью. Солнечные батареи: на монокристаллическом и аморфном кремнии, на поликристаллических пленках, с гетероструктурами.

### ***2.7 Светодиодающие структуры***

Полупроводниковые лазеры (общее представление). Светодиоды, параметры и характеристики. Светодиодные дисплеи. Оптроны и оптоэлектронные ИС.

## **3 Технология микроэлектроники и твердотельных приборов**

### ***3.1 Планарная технология***

Групповая обработка. Минимальный топологический размер (МТР) – основной показатель уровня технологии. Степень интеграции ИС. Динамика МТР и степени интеграции, закон Мура.

### ***3.2 Изготовление полупроводниковых пластин***

Определение кристаллографической ориентации монокристаллов полупроводников. Ориентированная резка, шлифовка, полировка пластин. Химическое травление и химическая полировка кремния и арсенида галлия.

Химико-механическая полировка. Финишная очистка пластин. Методы контроля качества очистки.

### ***3.3 Эпитаксия***

Методы эпитаксиального выращивания кремния. Создание диэлектрических покрытий на кремнии.

### ***3.4 Создание диэлектрических покрытий на кремнии***

Термодинамика процесса окисления кремния. Физическая модель процесса окисления кремния. Кинетика активного и пассивного окисления полупроводников. Структура окисла на кремнии. Перераспределение примеси при термическом окислении кремния. Формирование диэлектрических пленок методами осаждения из металлоорганических соединений.

### ***3.5 Диффузионные процессы в полупроводниках***

Физические основы процесса диффузии. Основные уравнения. Граничные условия и расчетные формулы для наиболее важных случаев диффузии. Методы проведения диффузионных процессов. Структурные схемы диффузионных печей. Особенности диффузии в соединениях АЗВ5.

### ***3.6 Электронно-ионная технология***

Методы получения электронных и ионных пучков. Ионное легирование. Имплантация ионов. Плазмохимические и ионно-плазменные методы обработки полупроводниковых, диэлектрических и металлических слоев.

### ***3.7 Металлизация***

Получение тонких пленок термическим испарением в вакууме. Ионно-плазменное распыление. Химическое осаждение из газовой фазы. Оборудование для получения тонких пленок. Материалы тонкопленочной технологии.

### ***3.8 Литография***

Фотолитография. Основные типы оборудования для фото- литографии. Проекционная фотолитография, электроннолучевая литография и рентгенолитография. Фотошаблоны и их изготовление.

### ***3.9 Сборка полупроводниковых приборов и интегральных микросхем***

Корпуса полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. Методы герметизации. Бескорпусные приборы. Методы отвода тепла в мощных полупроводниковых приборах.

## **4 Физические эффекты в малоразмерных твердотельных структурах, специфические приборы нанoeлектроники и методы их изготовления**

### ***4.1 Размерное квантование в гетероструктурах***

Примеры структур с размерно-квантованным энергетическим спектром: квантовые ямы, квантовые нити и квантовые точки. Сверхрешетки. Туннелирование на одиночном барьере. Двухбарьерная структура. Резонансно-туннельные диод и транзистор. Эффект Джозефсона.

### ***4.2 Транспортные явления в малоразмерных полупроводниковых структурах***

Модулированное легирование. Полевые транзисторы с высокой подвижностью электронов (HEMT). Гетеропереходный биполярный транзистор.

### ***4.3 Квантовый эффект Холла***

Энергетический спектр носителей заряда в магнитном поле. Квантование холловского сопротивления двумерного электронного газа в магнитном поле. Дробный квантовый эффект Холла.

### ***4.4 Одноэлектроника***

Квантование кулоновской энергии в мезоскопических системах. Явление кулоновской блокады при туннелировании через переходы с малой емкостью. Одноэлектронные транзисторы и схемы на их основе.

### ***4.5 Элементная база квантовых компьютеров***

Представления об элементной базе квантовых компьютерах – кубитах. Свойства кубита. Управление эволюцией кубита. Элементарные одно-кубитовые и двух-кубитовые операции как основа квантовых вычислений. Представление о принципах квантовой связи на одиночных фотонах.

## **5 Функциональная электроника**

### ***5.1 Криоэлектроника***

Сверхпроводники первого и второго рода. Высокотемпературные сверхпроводники. Эффект Джозефсона: стационарный и нестационарный. Квантование магнитного потока, квантовое обобщение уравнения Лондонов.

### ***5.2 Акустоэлектроника***

Элементы теории упругости: тензоры деформаций, напряжений, моделей упругости, упругих постоянных. Уравнение движения изотропной упругой среды. Волны Рэлея. Распределение энергии в рэлеевской волне. Рэлеевские волны в кристаллах, особенности, обусловленные анизотропией. Волны Лява.

### ***5.3 Магнитоэлектроника***

Магнитоупорядоченные вещества и их магнитные характеристики. Обменное взаимодействие и магнитная анизотропия. Цилиндрические магнитные домены. Доменные границы. Генерация, деление, перемещение и детектирование цилиндрических магнитных доменов. Запоминающие устройства и процессоры сигналов на цилиндрических магнитных доменах.

### ***5.4 Оптоэлектроника***

Динамические неоднородности, континуальные среды, генераторы и детекторы. Физические основы приборов функциональной оптоэлектроники. Функциональная акустооптика. Фотоупругий эффект. Акустооптическое взаимодействие.

### ***5.5 Диэлектрическая электроника***

Диэлектрические среды: сегнетоэлектрики, пьезоэлектрики, пироэлектрики, сегнетомагнетики. Электрические домены, фазоны, флуктоны. Явления в слоистых структурах на основе диэлектрических, металлических и полупроводниковых сред.

## **ЛИТЕРАТУРА**

### ***Основная***

1. Шалимова К. В. Физика полупроводников. – СПб.: Лань, 2010. - 400 с.

2. Драгунов В. П., Неизвестный И. Г., Гридчин В. А. Основы наноэлектроники: Учеб.пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. - 496 с.
  3. Пасынков В. В., Чиркин Л. К. Полупроводниковые приборы. - СПб.: Лань, 2006. -480 с.
  4. Степаненко И. П. Основы микроэлектроники. – М.: Лаборатория базовых знаний, 2004.-488 с.
  5. Барыбин А. А., Сидоров В. Г. Физико-технологические основы электроники. – СПб.: Лань, 2001.-272 с.
  6. Барыбин А. А., Томилин В. И., Шаповалов В. И. Физико-технологические основы макро-, микро-, и наноэлектроники. – М.: Физматлит, 2011. - 784 с.
  7. Щука А. А. Электроника. Учебное пособие / Под ред. Проф. А. С. Сигова. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. - 800 с.
  8. Щука А. А. Наноэлектроника. – М.: Физматкнига, 2007. - 464 с.
  9. Алексенко А. Г. Основы микросхемотехники. – М.:Физматлит, 2002.
  10. Шик А. Я., Бакуева Л. Г., Мусихин С. Ф., Рыков С. А. Физика низкоразмерных систем/ под ред. А. Я. Шика. – СПб.: Наука, 2001.
  11. Бауместер Д., Экерт А., Цайлингер А. Физика квантовой информации. – М.: Постмаркет, 2002.
  12. Нанотехнология: физика, процессы, диагностика, приборы / Под ред. Лучинина В. В., Таирова Ю. М. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. - 552 с.
  13. Нанотехнологии в электронике / Под ред. Ю. А. Чаплыгина. – М.: Техносфера, 2005.-448 с.
- Дополнительная*
14. Рамбиди Н. Г. Нанотехнологии и молекулярные компьютеры. – М.: Физматлит, 2007.-256 с.
  15. Нанотехнологии в полупроводниковой электронике / Отв. редактор А. Л. Асеев. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2004. - 368 с.
  16. Неволин В. К. Зондовые нанотехнологии в электронике. – М.: Техносфера, 2005.-152 с.



### Перечень вопросов к экзамену:

1. Общие свойства полупроводников.
2. Поликристаллические и аморфные полупроводники. Зонная теория твердого тела.
3. Электропроводность полупроводников. Носители заряда в слабом электрическом поле. Подвижность электронов и дырок.
4. Основные свойства  $p-n$ -переходов.
5. Электронно-дырочный  $p-n$ -переход. Вольтамперная характеристика  $p-n$ -перехода.
6. Токи носителей заряда в  $p-n$ -переходе, квазиуровни Ферми.
7. Структура металл-диэлектрик-полупроводник.
8. Фотоэлектрические явления в полупроводниках.
9. Приборы твердотельной электроники и микроэлектроники
10. Полупроводниковые диоды.
11. Транзисторы.
12. Полупроводниковые интегральные схемы.
13. Полупроводниковые лазеры
14. Технологии микроэлектроники и твердотельных приборов
15. Электронно-ионная технология.

Программа соответствует паспорту номенклатуры специальностей научных работников.

Директор ИИФиРЭ

Составитель программы:  
канд. физ.-мат. наук, доцент,  
заведующий кафедрой  
приборостроения и наноэлектроники

А.В. Минаков

А.А. Левицкий