

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



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе

/Д.С. Гуш/

«30» октября 2023 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 нанoeлектроники,

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-, И²Л- 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 однокубитовые и двухкубитовые 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