

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ»**

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»

по научной работе

Драгунов В.К.

« ____ » _____ 2022 г.

**ПРОГРАММА ВСТУПИТЕЛЬНОГО ИСПЫТАНИЯ
ПО СПЕЦИАЛЬНОЙ ДИСЦИПЛИНЕ ПРИ ПОСТУПЛЕНИИ В
АСПИРАНТУРУ**

Группа научных специальностей – 2.2. Электроника, фотоника, приборостроение
и связь

Научная специальность – 2.2.2. Электронная компонентная база микро- и
наноэлектроники, квантовых устройств

Москва, 2022

1. Физика полупроводников и полупроводниковых приборов

Общие свойства полупроводников. Природа химической связи. Структура кристаллов. Идеальные и реальные кристаллы. Дефекты в кристаллах. Свойства основных монокристаллических материалов микроэлектроники: Si, GaAs и др. Поликристаллические и аморфные полупроводники.

Понятие о некристаллических твердых телах. Атомная структура. Средний порядок расположения атомов. Дефекты в некристаллических полупроводниках. Классификация некристаллических систем. Структурная модификация свойств некристаллических полупроводников.

Стеклообразование и стеклообразные материалы. Количественные характеристики систем стеклообразования. Электрофизические свойства некристаллических полупроводников. Эффект переключения в халькогенидных стеклообразных полупроводниках.

Зонная теория твердого тела. Энергетические спектры электронов в металлах, полупроводниках, диэлектриках. Зона проводимости и валентная зона. Электроны и дырки. Эффективная масса электрона. Экситоны. Собственные и примесные полупроводники. Донорные и акцепторные примеси.

Основы статистической физики. Функция распределения Ферми-Дирака. Концентрация электронов и дырок в зонах и их температурные зависимости. Распределение Максвелла-Больцмана. Критерий вырождения электронного газа. Вырожденные и невырожденные полупроводники.

Рекомбинация носителей заряда. Рекомбинация «зона-зона» и рекомбинация через примеси и дефекты. Теория рекомбинации Шокли-Рида. Диффузионная длина и время жизни носителей. Поверхностная рекомбинация.

Электропроводность полупроводников. Носители заряда в слабом электрическом поле. Взаимодействие с фононами, примесными атомами, дефектами. Подвижность электронов и дырок. Условие электронейтральности. Диффузия и дрейф носителей заряда. Соотношение Эйнштейна. Носители заряда в сильном электрическом поле. Горячие электроны. Лавинное умножение в полупроводниках. Электрические домены и токовые шнуры. Эффект Ганна.

Уравнение для плотности электрического тока в полупроводниках. Уравнение непрерывности. Уравнение Пуассона.

Электронно-дырочный ($p-n$) переход. Инжекция и экстракция неосновных носителей заряда. Вольт-амперная 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. Частотные и импульсные свойства. Пробой $p-n$ перехода: тепловой, лавинный, туннельный.

Транзисторный эффект. Зонная диаграмма полупроводниковой структуры с двумя близко расположенными $p-n$ переходами. Коэффициент инжекции. Коэффициент переноса носителей через базу. Коэффициент усиления транзистора (по току, по напряжению, по мощности).

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

Структура металл-диэлектрик-полупроводник. Зонная диаграмма и ее изменение при приложении напряжения. Роль поверхностных состояний, подвижных и неподвижных зарядов в диэлектрике.

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

Фотоэлектрические явления в полупроводниках. Поглощение излучения: собственное и примесное, экситонное и на свободных носителях заряда. Закон или Бугера-Ламберта-Бера. Красная граница поглощения. Фотопроводимость. Спектральная характеристика. Фотовольтаический эффект в $p-n$ переходе.

Излучение полупроводников. Прямые и непрямые переходы носителей заряда. Виды люминесценции: инжекционная, катодо-, фото—люминесценция. Спектры излучения. Правило Стокса, антистоксова люминесценция. Квантовый выход. Вывод излучения из полупроводников.

Лазерный эффект в полупроводниках. Индуцированное (стимулированное) излучение. Оптический резонатор, усиление и генерация света. Пороговый ток.

Термоэлектрические явления. Термо- и гальваномагнитные эффекты. Эффект Холла. Электро-, магнито-, акустооптические эффекты. Поверхностные акустические волны. Акустоэлектронные волны.

2. Приборы твердотельной электроники и микроэлектроники

Полупроводниковые диоды. Устройство и основные параметры. Выпрямительные и импульсные диоды. Варикапы. Стабилитроны и обращенные диоды. Туннельные диоды. Диоды СВЧ: детекторные и смесительные, диоды Шоттки, $p\text{-}i\text{-}n$ -диоды, лавинно-пролетные диоды, диоды Ганна.

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

транзисторы, в том числе СВЧ. Транзисторы с изолированным затвором (IGBT).

Тиристоры и их разновидности (динистор, тиристор, симистор). Основные параметры.

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.

Полупроводниковые интегральные схемы. Транзисторы, диоды и другие элементы в интегральном исполнении. Межэлементная изоляция. МИС, СИС, БИС, СБИС. Классификация микросхем по конструктивно-технологическому принципу: n - и p -МОП, КМОП-ИС; Би-КМОП; «кремний-на-изоляторе» («кремний-на-сапфире»)-ИС; GaAs-ИС на полевых транзисторах с барьером Шоттки (ПТШ)

Микросхемотехника. Цифровые и аналоговые ИС. Базовые логические элементы: n -МОП, p -МОП, КМОП, ПТШ. Микропроцессоры. Полупроводниковые запоминающие устройства (статические и динамические постоянное запоминающие устройства, SRAM и DRAM). Программируемые логические матрицы. Базовые матричные кристаллы.

R-2R-матрица. ЦАП, АЦП. АЦП непрерывного преобразования. Приоритетный шифратор. «Следящий» АЦП. АЦП последовательного действия. Сигма-дельта АЦП. Операционные усилители. Основные параметры. Компараторы.

Специфика интегральных СВЧ-устройств.

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

Полупроводниковые лазеры (общее представление).

Светодиоды, параметры и характеристики. Суперяркие светодиоды. ИК-излучатели. Полимерные светодиоды (общее представление).

3. Технология микроэлектроники и твердотельных приборов

Планарная технология – общая схема техпроцесса. Минимальный топологический размер (МТР) – основной показатель уровня технологии. Понятие «лямбда» в проектировании технологии. Степень интеграции ИС. Динамика МТР и степени интеграции, закон Мура.

Перспективы развития планарной технологии. Гибридная технология.

Микросборки и БИС на подложках.

Изготовление полупроводниковых пластин. Определение кристаллографической ориентации монокристаллов полупроводников. Ориентированная резка, шлифовка, полировка пластин.

Эпитаксия. Методы эпитаксиального выращивания кремния. Методы контроля качества эпитаксиальных слоев. Распределение примесей в эпитаксиальных слоях. Дефекты эпитаксиальных пленок. Получение эпитаксиальных гетеропереходов. Выращивание эпитаксиальных пленок A^3B^5 . Оборудование для эпитаксиального выращивания пленок. Сравнение газотранспортной, жидкофазной, МОС-гидридной и молекулярной эпитаксий.

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.

Зарядовое состояние системы полупроводник–диэлектрик; факторы, влияющие на величину и знак заряда в системе. Связь параметров полупроводниковых приборов и ИС с зарядовым состоянием системы кремний–окисел.

Диффузия 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 A^3B^5 .

Электронно-ионная технология. Методы получения электронных и ионных пучков. Ионное легирование. Имплантация ионов. Плазмохимические и ионно-плазменные методы обработки полупроводниковых, диэлектрических и металлических слоев. Дефекты, вносимые электронно-ионной обработкой, их устранение. Конструктивные схемы ионных имплантеров и оборудования для электронно-ионной и ионно- химической обработки.

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

Литография. Фотолитография. Основные типы оборудования для фотолитографии. Проекционная фотолитография, электроннолучевая литография и рентгенолитография. Фотошаблоны и их изготовление. Дефекты микросхем, связанные с фотолитографическими процессами.

Структуры элементов полупроводниковых ИС. Методы изоляции элементов. Технология структур «кремний на изоляторе». Структура и свойства элементов ИС.

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

4. Моделирование, испытания, надежность приборов твердотельной электроники, радиоэлектроники и изделий микро- и нанoeлектроники

Моделирование как основа проектирования приборов твердотельной, микро- и нанoeлектроники. Методики построения физических и математических моделей. Двух- и трехмерное моделирование. Имитационное моделирование. Примеры моделей транзисторов, элементов микросхем. Системы моделирования и автоматизированного проектирования (общее представление).

Испытание изделий на устойчивость к воздействию внешних факторов: механических, климатических, радиационных, Виды испытаний: приемосдаточные, периодические, квалификационные. Особенности поведения полупроводниковых приборов и микросхем при различных видах радиационных и космических воздействий. Методы повышения радиационной стойкости приборов.

Основные положения, понятия и определения современной теории надежности. Статистические методы оценки и прогнозирования показателей надежности и долговечности. Физика причин отказов полупроводниковых приборов и микросхем. Катастрофические (внезапные) и деградационные (постепенные) отказы. Методы выявления потенциально ненадежных приборов и микросхем. Ускоренные испытания и имитационные методы испытаний.

5. Радиоэлектронные компоненты

Физические явления, определяющие электропроводность толсто пленочных резистивных материалов.

Толсто пленочные резисторы.

Основные типы постоянных и переменных резисторов. Физические явления, определяющие емкостные свойства конденсаторов.

Типы, параметры и конструкции конденсаторов постоянной и переменной емкостей.

Физические основы работы линий задержек на поверхностных акустических волнах.

Полупроводниковые термо- и фототранзисторы, позисторы, варисторы, болометры (общее представление)

6. Физические эффекты в малоразмерных твердотельных структурах, специфические приборы наноэлектроники и методы их изготовления, основные принципы создания приборов на квантовых эффектах

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.

Транспортные явления в малоразмерных полупроводниковых структурах. Модулированное легирование. Полевые транзисторы с высокой подвижностью электронов (HEMT). Гетеропереходный биполярный транзистор.

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

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

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.

Литература

1. Шалимова К.В. Физика полупроводников. СПб.: издательство Лань. 2010. 384 с. ISBN 978-5-8114-09228-8.
2. Старосельский В.И. Физика полупроводниковых приборов микроэлектроники: учеб. пособие/ - М.: Высшее образование; Юрайт-Издат, 2011. – 463 с. – (Основы наук). ISBN 978-5-9916-0808-4.
3. Твердотельная электроника : учебное пособие для вузов по направлению 010700 "Физика" и специальности 010701 "Физика" / В. А. Гуртов . – 3-е изд., доп . – М. : Техносфера, 2008 . – 512 с. – (Мир электроники) . - ISBN 978-5-94836-187-1.

4. Лебедев А.И. Физика полупроводниковых приборов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 488 с.
5. Синкевич О.А. Физика твердого тела: учебное пособие. - М.: Издательство МЭИ, 2017. – 244 с. ISBN 978-5-7046-1817-1.
6. Пасынков В.В. Полупроводниковые приборы : Учебник для вузов / В. В. Пасынков, Л. К. Чиркин. – 7-е изд., испр. – СПб. : Лань, 2003 . – 480 с.
7. Филачев А.М., Таубкин И.И., Трищенко М.А. Твердотельная фотоэлектроника. Физические основы. – М.: Физматкнига, 2007. – 384 с.
8. Зи С.М. Физика полупроводниковых приборов, ч.1 и 2, – М.: Мир. 1984.
9. Технология СБИС: В 2-х кн. Кн. 2 / Пер. с англ. Под ред. Зи С. – М.: Мир, 2008. – 305 с.
10. Борисенко, В. Е. Нанoeлектроника : учебное пособие для вузов по специальностям "Микро- и нанoeлектронные технологии и системы" и "Квантовые информационные системы" / В. Е. Борисенко, А. И. Воробьева, Е. А. Уткина . – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009 . – 223 с. – (Нанотехнологии) . - ISBN 978-5-947749-14-4 .
11. Нанoeлектроника: теория и практика: учебник/ В.Е. Борисенко, А.И. Воробьева, А.Л. Данилюк, Е.А. Уткина. – 2-ое изд., перераб., и доп. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013 . – 366 с.:ил. – (Учебник для высшей школы).
12. Нанoeлектроника [Электронный ресурс]: учебное пособие/ А.А. Щука; под ред. А.С. Сигова. – 3-е изд. (эл.) – М. Бином. Лаборатория знаний, 2015. – 342 с.6 ил. – (Нанотехнологии). ISBN 978-5-9963-1055-5.
13. Белоус А.И., Емельянов В.А., Турцевич А.С. Основы схемотехники микроэлектронных устройств М.: Техносфера, 2012. – 472 с.
14. Технология, конструкции и методы моделирования кремниевых интегральных микросхем: в 2 ч. / Королев М.А., Крупкина Т.Ю., Ревелева М.А., под общей ред. Чаплыгина Ю.А. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний. –2007. Ч. 1: Технологические процессы изготовления кремниевых интегральных схем и их моделирование. – 397 с.
15. Технология, конструкции и методы моделирования кремниевых интегральных микросхем: в 2 ч. / Королев М.А., Крупкина Т.Ю., Путря М.Г., Шевяков В.И., под общей ред. члена-корр. РАН профессора Чаплыгина Ю.А. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний. – 2009. Ч. 2: Элементы и маршруты изготовления кремниевых ИС и методы их математического моделирования. – 422 с.
16. Коледов Л.А. Технология и конструкции микросхем, микропроцессоров и микросборок: Учебник для вузов / М.: Радио и связь, 1989. – 400 с.
17. Киреев В.Ю. «Введение в технологии микроэлектроники и нанотехнологии». ГНЦ РФ «ЦНИИХМ», 2008 г.

«Согласовано»

Директор ИРЭ
к.т.н., доцент

Куликов Р.С.