

Министерство образования Республики Беларусь

**Учреждение образования
"БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ"**

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по научной работе
_____ А.П. Кузнецов
"__" _____ 2009 г.

ПРОГРАММА

**вступительного экзамена в аспирантуру по специальности
05.27.01**

**«Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты,
микро- и нанoeлектроника и приборы на квантовых эффектах»**

Минск, 2009

СОСТАВИТЕЛИ:

Борисенко В.Е., д.ф-м.н, профессор, зав. кафедрой микро- и наноэлектроники БГУИР.

Абрамов И.И., д.ф-м.н., профессор, профессор кафедры микро- и наноэлектроники БГУИР.

Хмыль А.А., д.т.н., профессор, проректор по учебной работе БГУИР.

Нелаев В.В., д.ф-м.н., профессор, профессор кафедры микро- и наноэлектроники БГУИР

Колосницын Б.С., к.т.н., профессор, профессор кафедры микро- и наноэлектроники

РЕКОМЕНДОВАНА К УТВЕРЖДЕНИЮ:

Кафедрой микро- и наноэлектроники учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» (протокол № 10 от « 8 » июня 2009г.)

Заведующий кафедрой
микро- и наноэлектроники

В.Е. Борисенко

Одобрена методической комиссией факультета радиоэлектроники

« ____ » _____ июня 2009 г. (протокол № ____)

Председатель комиссии

Д.В. Гололобов

1. Физика полупроводников

Природа химической связи в полупроводниках. Структура кристаллов. Идеальные и реальные кристаллы. Дефекты в кристаллах. Свойства основных монокристаллических материалов микроэлектроники: Si, GaAs, Ge.

Поликристаллические и аморфные полупроводники. Зонная теория твердого тела. Энергетические спектры электронов в металлах, полупроводниках, диэлектриках. Зона проводимости и валентная зона. Эффективная масса электрона. Собственные и примесные полупроводники. Роль донорных и акцепторных примесей.

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

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

Гетеропереходы. Контакт металл-полупроводник. Омический и выпрямляющий переходы.

Теплопроводность полупроводников. Термоэлектрические явления. Термо- и гальваномагнитные эффекты. Эффект Холла.

Поглощение излучения в полупроводниках. Фотопроводимость. Спектральные характеристики фотопроводимости. Другие виды внутреннего фотоэффекта.

Эффекты излучения в полупроводниках. Прямые и непрямые переходы носителей заряда. Виды люминесценции: инжекционная, катодо-, фотолюминесценция.

Электро-, магнито- и акустические эффекты в твердых телах.

Основная литература

1. Шалимова К.В. Физика полупроводников. – М.: Высшая школа, 1976, 1986.
2. Ашкрофт Н., Мермин Н. Физика твердого тела: в 2 т. – М.: Мир, 1979.
3. Аваев Н.А. Основы микроэлектроники. – М.: Сов. Радио, 1991.
4. Панков Н. Оптические процессы в полупроводниках. – М.: Мир, 1983.
5. Степаненко И.П. Основы микроэлектроники. – М. ЛБЗ. 2004.

Дополнительная литература

1. Павлов В.П., Хохлов А.Ф. Физика твердого тела. – М.: Высшая школа, 1985. – 384 с.
2. Грибковский В.П. Теория поглощения и испускания света в полупроводниках. – Мн.: Наука и техника, 1975.
3. Уханов Ю.И. Оптические свойства полупроводников. М.: Радио, 1977.
4. Носов Ю.Р. Оптоэлектроника. – М.: Сов. Радио, 1989.
5. Волчѣк С.А., Петрович В.А. Оптические свойства твердых тел. Лабораторный практикум по курсу «Физика твердого тела», Минск.: БГУИР, 2006.

2. Приборы твердотельной электроники и микроэлектроники

Полупроводниковые диоды. Основные параметры и характеристики диодов, их зависимость от температуры и режима. Эквивалентные схемы. Импульсные и частотные свойства диодов. Физико-топологические модели диодов.

Выпрямительные и импульсные диоды. СВЧ диоды. Диоды с накоплением заряда. Варикапы. Стабилитроны. Туннельные и обращенные диоды. Лавинно-пролетные диоды. Диоды Шоттки.

Биполярные транзисторы. Структура и принцип действия. Распределение потока носителей в активном нормальном режиме работы. Эффект Эрли и его следствия. Основные параметры и характеристики транзисторов, их зависимость от температуры и режима. Эквивалентные схемы и математические модели транзистора: Эберса Мола, Линвилла, зарядовая. Импульсные и частотные свойства транзисторов. Работа транзистора при высоком уровне инжекции. Виды пробоя транзистора. Шумы в транзисторах. Мощные транзисторы. СВЧ транзисторы.

Двух- и трехэлектродные тиристоры, принцип их действия и классификация. Основные параметры и характеристики.

Полевые каналные транзисторы: полевые транзисторы с управляющим *p-n*-переходом и затвором Шоттки. Принцип действия. Модуляция глубины канала. Основные электрические параметры и характеристики транзисторов. Эквивалентные схемы. Частотные и импульсные свойства транзисторов.

МОП-транзисторы. Идеальная и реальная МОП-структуры. Величина порогового напряжения и пути ее регулирования. Параметры. Физическая эквивалентная схема и частотные свойства. Эффекты, связанные с малыми размерами транзистора. Мощные СВЧ МОП-транзисторы. МДП транзисторы со встроенным каналом. МНОП-структуры. Физико-топологические модели МОП-транзисторов.

Интегральные микросхемы. Классификация интегральных микросхем по конструктивно-технологическому и функциональному признакам. Цифровые и аналоговые микросхемы. Полупроводниковые запоминающие устройства и

микропроцессоры. Биполярные ТТЛ, ЭСЛ и И²Л-схемы, КНИ: с *p*- и *n*-каналами, КМОП.

Приборы с зарядовой связью. Принцип действия, основные параметры и области применения.

Оптоэлектронные приборы. Назначение и области применения. Фотоприемники: фотодиоды, фототранзисторы, фоторезисторы, лавинные фотодиоды. Основные параметры и характеристики: фоточувствительность, обнаружительная способность, быстродействие. Солнечные батареи. Полупроводниковые излучатели: светодиоды и лазеры. Приборы для систем отображения информации. Оптроны и оптоэлектронные интегральные микросхемы.

Термоэлектрические и гальваномагнитные полупроводниковые приборы. Твердотельные датчики, включая микроэлектронные преобразователи информации.

Акустоэлектроника, магнитоэлектроника, криоэлектроника (общее представление). Функциональная электроника.

Основная литература

1. Ферри Д., Эйкерс П., Гринич Э. Электроника ультрабольших интегральных схем. – М.: Мир, 1991.
2. Колосницын Б.С. Элементы интегральных схем. Физические основы. – Мн.: БГУИР, 2001. – 138 с.
3. Малер Р., Кейминс Т. Элементы интегральных схем. – М.: Мир, 1989.
4. Абрамов И.И. Лекции по моделированию интегральных схем. Москва – Ижевск: НИЦ РХД, 2005. – 152 с.
5. Степаненко И.П. Основы микроэлектроники. – М.: ЛБЗ, 2004.
6. Колосницын Б.С. Мощные и СВЧ полупроводниковые приборы. Мн.: БГУИР, 2008. – 143.

Дополнительная литература

1. Викулин И.Н., Стафеев В.И. Физика полупроводниковых приборов. – М.: Сов. Радио, 1990.
2. Россадо Л. Физическая электроника и микроэлектроника. – М.: Высшая школа, 1991.
3. Абрамов И.И. Моделирование физических процессов в элементах кремниевых интегральных микросхем. – Мн.: БГУ, 1999. – 189 с.
4. Колосницын Б.С. Электронные приборы на основе полупроводниковых соединений. – Мн.: БГУИР, 2006 г. – 102 с.

3. Нанoeлектроника и приборы на квантовых эффектах

Квантовое ограничение и основные типы низкоразмерных структур – квантовые точки, шнуры, пленки. Туннелирование. Баллистический транспорт. Спиновые эффекты.

Элементы низкоразмерных структур – свободная поверхность и границы раздела. Сверхрешетки. Моделирование атомных конфигураций в наноструктурах.

Структуры с квантовым ограничением, индуцированным внутренним электрическим полем – квантовые колодцы, Модуляционно-легированные структуры, дельта-легированные структуры.

Структуры с квантовым ограничением, индуцированным внутренним электрическим полем – МОП-структуры, структуры с расщепленным электродом.

Технологические методы формирования наноразмерных структур. Химическое осаждение из газовой фазы с использованием металлоорганических соединений. Молекулярно-лучевая эпитаксия. Электронно-лучевая литография. Атомная инженерия с использованием сканирующего туннельного и атомного силового микроскопов. Методы зондовой инженерии. Нанолитографические методы. Формирование наноструктур в саморегулирующихся процессах. Наноструктурированные материалы – пористый кремний, углеродные нанотрубки.

Особенности переноса носителей заряда в наноразмерных структурах – баллистический и квазibalлистический транспорт. Квантование проводимости в структурах с баллистическим транспортом. Электрическое сопротивление наноразмерного многополюсника. Влияние магнитного поля на транспорт носителей заряда. Эффект Ааронова-Бома. Квантовый эффект Холла: интегральный и дробный.

Одноэлектронное туннелирование в условиях кулоновской блокады. Явления в однобарьерной и двухбарьерной структурах. Со-туннелирование. Резонансное туннелирование через квантовый колодец. Резонансное туннелирование через систему периодически расположенных квантовых колодцев.

Электронные приборы на квантовых эффектах. Интерференционные транзисторы. Приборы на эффекте одноэлектронного туннелирования. Диоды и транзисторы на эффекте резонансного туннелирования. Атомные переключатели и реле.

Оптоэлектронные приборы на квантовых эффектах. Излучатели когерентного и некогерентного света. Фотодетекторы.

Квантовые вычисления и квантовые компьютеры. Интеграция элементов нанoeлектроники и биологических объектов.

Основная литература

1. Борисенко В.Е., Воробьева А.И., Уткина Е.А. Нанoeлектроника. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009.
2. Borisenko V.E., Ossicini S. What is What in the Nanoworld (Wiley-VCH, Weinheim, 2004).
3. Херман М. Полупроводниковые сверхрешетки. – М.: Мир, 1989. – 240 с.
4. Davies J.H. The Physics of Low-Dimensional Semiconductors: An Introduction. Cambridge University Press, Cambridge, 1998.
5. Драгунов В.П., Неизвестный И.Г., Гридин В.А. Основы нанoeлектроники. – Новосибирск: изд-во Н ГТУ, 2000. – 332 с.
6. Молекулярно-лучевая эпитаксия и гетероструктуры / Под ред. Л.Ченга, К.Плога. – М.: Мир, 1989. – 584 с.
7. Валиев К.А., Кокина А.А. Квантовые компьютеры: надежды и реальности. – Ижевск: НИЦ РХД, 2001. – 352 с.

Дополнительная литература

1. Грибковский В.П. Теория поглощения и испускания света в полупроводниках. – Мн.: Наука и техника. 1997.
2. Хакен Х. Квантовополевая теория твердого тела. – М.: Наука, 1980. – 240 с.
3. Абрамов И.И., Новик Е.Г. Численное моделирование металлических одноэлектронных транзисторов. – Мн.: Бестпринт, 2000. – 164 с.
4. Ferry D.K., Goodnick S.M. Transport in Nanostructures.-Cambridge University Press. – Cambridge, 1997.
5. Davies J.H. The Physics of Low-Dimensional Semiconductors: An Introduction.-Cambridge University Press.- Cambridge, 1998.

4. Технологические процессы производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем

Определение кристаллографической ориентации полупроводников. Ориентированная резка, шлифовка и полировка пластин.

Химическое травление и химическая полировка германия, кремния и арсенида галлия. Химико-механическая полировка. Финишная очистка пластин. Методы контроля качества очистки.

Планарная технология. Физические основы процесса диффузии. Основные уравнения. Граничные условия и расчетные формулы для наиболее важных частных случаев диффузии. Практические методы проведения диффузионных процессов.

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

вносимые электронно-ионной обработкой, их устранение. Конструктивные схемы основных типов оборудования для электронно-ионной и ионно-химической обработки.

Формирование эпитаксиальных слоев. Распределение примесей и дефекты в эпитаксиальных слоях.

Термическое окисление кремния. Анодное окисление металлов и полупроводников. Свойства окисных слоев.

Получение тонких пленок: термическим испарением в вакууме, ионным и ионно-плазменным распылением, химическим осаждением из газовой фазы. Оборудование для получения и контроля параметров тонких пленок.

Формирование топологии элементов полупроводниковых приборов и интегральных микросхем: фотолитография, электронно-лучевая литография и рентгенография. Фотошаблоны и их изготовление. Травление металлов, полупроводников, диэлектриков: жидкостное, плазменное, ионное, ионно-плазменное. Дефекты микросхем, связанные с фотолитографическими процессами.

Основы конструирования полупроводниковых интегральных микросхем. Методы изоляции элементов. Изопланарная технология, эпоксид-процесс, технология «кремний на изоляторе».

Тонкопленочные интегральные микросхемы. Толстопленочные интегральные микросхемы. Гибридные интегральные микросхемы.

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

Основы автоматизированного проектирования полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. Архитектурное проектирование. Функционально-логическое проектирование. Схемотехническое проектирование. Конструкторско-технологическое проектирование. Проектирование технологических процессов, приборов и элементов. Системы автоматизированного проектирования и их структура.

Основная литература

1. Технология СБИС: в 2 т. / Под ред. С.Зи. – М.: Мир, 1986.
2. Моро У. Микролитография. В 2 т. – М.: Мир, 1990.
3. Готра З.Ю. Технология микроэлектронных устройств. – М.: Радио и связь, 1991. – 528 с.
4. Проектирование СБИС / М. Ватанабэ, К. Асада, К. Кани, Т. Оцуки. – М.: Мир, 1988.
5. Киносита К., Асада К., Карацу О. Логическое проектирование СБИС. – М.: Мир, 1988.
6. Казённов Г.Г., Соколов А.Г. Принципы и методология построения САПР БИС. – М.: Высш. шк., 1990. – 142 с.

Дополнительная литература

1. Химическая обработка и технологии интегральных микросхем / В.П. Василевич, А.М. Кисель, А.Б. Медведева, В.И. Плебанович, Ю.А. Родионов. – Полоцк: ПГУ, 2001. – 260 с.
2. Родионов Ю.А. Литография в производстве интегральных микросхем. – Мн. Дизайн ПРО, 1998.
3. Казённов Г.Г., Соколов А.Г. Основы построения САПР и ВСТПП. – М.: Высш. шк., 1989. – 200 с.

5. Обеспечение качества и надежности полупроводниковых приборов и интегральных микросхем

Организация контроля качества полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. Методы измерения статических, динамических, импульсных и шумовых параметров полупроводниковых приборов.

Виды производственных испытаний. Количественные характеристики надежности. Эксплуатационная надежность. Надежность элементов интегральных микросхем. Классификация и основные виды отказов. Механизмы отказов. Статистические и физические методы анализа и прогнозирования отказов. Методы повышения надежности полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. Действие радиации на полупроводниковые приборы и интегральные микросхемы.

Основная литература

1. Чернышев А.А. Основы надежности полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. – М.: Радио и связь, 1988. – 256 с.
2. Управление качеством электронных средств / Под ред. Щ.П. Глудкина. – М.: Высш. шк., 1994.
3. Литвинский И.Е., Прохоренко В.А., Смирнов А.Н. Обеспечение безотказности микроэлектронной аппаратуры на этапе производства. – Мн. Беларусь, 1989.

Дополнительная литература

1. Львович Я.Е., Фролов В.Н. Теоретические основы конструирования, технологии и надежности РЭА. – М.: Радио и связь, 1986.

6. Автоматизированное проектирование интегральных микросхем

Инженерно-физическое и численное моделирование и проектирование технологии изготовления изделий микроэлектроники. Инженерное и физическое приближения к задачам описания технологических процессов

микроэлектроники. Обобщенное уравнение непрерывности, используемое при моделировании процессов перераспределения примесей. Физико-математическое моделирование процессов ионной имплантации диффузионного перераспределения примесей, осаждения и окисления кремния.

Программные комплексы, предназначенные для проектирования технологии в микроэлектронике. Возможности и особенности программных комплексов SUPREM II, SUPREM III, SSUPREM4 компании Silvaco. Возможности и организация интерфейсных оболочек программных комплексов ряда SUPREM.

Физико-математическое моделирование и компьютерное проектирование приборов и систем микроэлектроники. Уровни компьютерного проектирования приборов и систем микроэлектроники. Характеристики основных программных пакетов схемотехнического проектирования. Методы и средства компьютерного проектирования приборов и систем микроэлектроники. Возможности и общие сведения о работе в среде пакетов PCAD, PSPICE, Design Center.

Входной файл для моделирования: описание компонентов, директивы на проведение анализов. Вывод и анализ результатов моделирования в среде SPICE. Состав и функциональные возможности системы схемотехнического проектирования DesignCenter. Моделирование аналоговых, цифровых и смешанных схем в среде DesignCenter.

Сквозное проектирование технологии/прибора/схемы в среде программного комплекса компании Silvaco. Назначение, возможности и организация работы в средах модулей ATHENA и ATLAS. Создание структуры моделируемого прибора.

Статистический анализ и оптимизация технологических параметров изготовления изделий микроэлектроники. Основные положения решения задачи статистического анализа и оптимизации технологии изготовления ИМС. Локальные и глобальные флуктуации технологических параметров. Методы аппроксимации результатов компьютерных и натуральных экспериментов. Метод поверхности откликов для статистической обработки результатов компьютерных и натуральных экспериментов. Планирование эксперимента.

Основная литература

1. МОП-СБИС. Моделирование элементов и технологических процессов / Под ред. П.Антонетти и др. - М.: Радио и связь, 1989.
2. Серия: "Автоматизация проектирования БИС". Учебное пособие для втузов. Книги 1-6. Под ред. Г.Г. Казеннова.- М.- "Высшая школа", 1990 г.
3. Разевиг В.Д. Система схемотехнического моделирования и проектирования печатных плат "DESIGN CENTER. PSPICE".- М.- "Радио и связь", 1996.
4. Серия: Системы автоматизированного проектирования. Учебное пособие для втузов. Книги 1-12. Под ред. И.П. Оренкова.- М.- "Высшая школа", 1996 г.

5. Нелаев В.В., Стемпицкий В.Р. Учебное пособие “Технологическое проектирование интегральных схем. Программа SSUPREM IV”. Мн. БГУИР. 2004. 102 с.

Дополнительная литература

1. Технология СБИС/ Под редакцией Зи, книги 1 и 2.- М.: Мир, 1986
2. Серия: “Разработка САПР”. Учебное пособие для втузов. Книги 1-10. Под ред. А. В. Петрова.- М.- "Высшая школа", 1990 г.
3. Ефимов И. Е., Козырь И. Я., Горбунов А. Ю. Микроэлектроника. Проектирование, виды микросхем, функциональная микроэлектроника. Учебное пособие для втузов.- М.- "Высшая школа", 1987 г.
4. Гурский Л. И., В.Я. Степанец. Проектирование микросхем.- Минск.- "Навука и техника", 1991
5. Нелаев В.В. Методическое пособие “Программа SUPREM II моделирования технологии изготовления интегральных схем”.- Минск, БГУИР, 1998 г.- 26 с. (в том числе в электронном виде).