

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования  
«Белорусский государственный университет информатики и  
радиоэлектроники»



«Утверждаю»

Проректор по научной работе БГУИР

А. Н. Осипов

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 г.

## ПРОГРАММА

вступительного экзамена в аспирантуру по специальности  
05.27.01 - Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты,  
микро- и нанoeлектроника и приборы на квантовых эффектах

Минск 2018

Программа составлена на основании типовых учебных планов по специальностям I - 41 01 02 "Микро- и нанoeлектронные технологии и системы", I - 41 01 03 "Квантовые информационные системы".

**СОСТАВИТЕЛИ:**

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

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

Мигас Д. Б. – д.ф.-м.н, доцент, профессор кафедры микро- и нанoeлектроники БГУИР

**РЕКОМЕНДОВАНА К УТВЕРЖДЕНИЮ**

Рассмотрена и рекомендована к утверждению на заседании кафедры микро- и нанoeлектроники (протокол № 10 от 9 апреля 2018 г.)

Заведующий кафедрой МНЭ  В. Е. Борисенко

Одобрена и рекомендована к утверждению методической комиссией факультета радиотехники и электроники (протокол № 7 от 23 апреля 2018 г.)

Председатель  О. В. Славинская

## **1. Цели и задачи программы**

Целью программы является установление объема и уровня профессиональных знаний поступающего в аспирантуру на специальность “Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника и приборы на квантовых эффектах”.

Задачи, обеспечивающие достижение этой цели, включают знания следующих основных разделов, включенных в программу:

- Физика полупроводников
- Приборы твердотельной электроники и микроэлектроники
- Нанoeлектроника и приборы на квантовых эффектах
- Технологические процессы производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем
- Обеспечение качества и надежности полупроводниковых приборов и интегральных микросхем
- Автоматизированное проектирование интегральных микросхем и технологии их изготовления.

## **2. Требования к знаниям, умениям и навыкам экзаменуемого**

Экзаменуемый должен знать:

- основы зонной теории твердого тела и статистики носителей заряда в полупроводниках;
- основные характеристики и режимы работы полупроводниковых приборов;
- основы работы приборов на квантовых эффектах и с использованием низкоразмерных структур;
- основные технологические процессы производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем;
- основы обеспечения качества и надежности полупроводниковых приборов и интегральных микросхем;
- основы автоматизированного проектирования интегральных микросхем и технологии их изготовления;

должен уметь:

- интерпретировать закономерности изменения физических параметров материалов при внешних воздействиях;
- рассчитывать основные характеристики работы полупроводниковых приборов в различных режимах;
- проектировать процессы изготовления изделий микроэлектронной техники;

- использовать математические алгоритмы для оптимизации проектирования интегральных микросхем.

### 3. Содержание программы

#### Раздел 1. Физика полупроводников

Тема 1.1. Природа химической связи в полупроводниках. Структура кристаллов. Идеальные и реальные кристаллы. Дефекты в кристаллах. Свойства основных монокристаллических материалов микроэлектроники: Si, GaAs, Ge.

Тема 1.2. 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.

Тема 1.3. 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.

Тема 1.4. 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.

Тема 1.5. Гетеропереходы. Контакт металл-полупроводник. Омический и выпрямляющий переходы.

Тема 1.6. Термоэлектрические явления. Термо- и гальваномагнитные эффекты. Эффект Холла.

Тема 1.7. Поглощение излучения в полупроводниках. Фотопроводимость. Спектральные характеристики фотопроводимости. Другие виды внутреннего фотоэффекта.

Тема 1.8. Излучение света полупроводниками. Прямые и непрямые переходы носителей заряда. Виды люминесценции: инжекционная, катодо-, фотолюминесценция.

## 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. Панков Н. Оптические процессы в полупроводниках. – М.: Мир, 1983.
4. Степаненко И.П. Основы микроэлектроники. – М. ЛБЗ. 2004.
5. Павлов В.П., Хохлов А.Ф. Физика твердого тела. – М.: Высшая школа, 1985. – 384 с.
6. Грибковский В.П. Теория поглощения и испускания света в полупроводниках. – Мн.: Наука и техника, 1975.
7. Физика конденсированного состояния / В. А. Гольдаде, Л. С. Пинчук. - Минск : Беларуская навука, 2009. - 657 с.
8. Введение в теорию полупроводников: учебное пособие для высших учебных заведений по физическим и техническим направлениям и специальностям / А. И. Ансельм. - Изд. 3-е, стереотипное. - Санкт-Петербург [и др.] : Лань, 2008. - 618 с.

## Раздел 2. Приборы твердотельной электроники и микроэлектроники

Тема 2.1. Полупроводниковые диоды. Основные параметры и характеристики диодов, их зависимость от температуры и режима измерения. Эквивалентные схемы. Импульсные и частотные свойства диодов. Физико-топологические модели диодов.

Тема 2.2. Выпрямительные и импульсные диоды. СВЧ диоды. Диоды с накоплением заряда. Варикапы. Стабилитроны. Туннельные и обращенные диоды. Лавинно-пролетные диоды. Диоды Шоттки.

Тема 2.3. 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.

Тема 2.4. Двух- и трехэлектродные тиристоры, принцип их действия и классификация. Основные параметры и характеристики.

Тема 2.5. 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.

Тема 2.6. Полевые 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.

Тема 2.7. Интегральные микросхемы. Классификация интегральных микросхем по конструктивно-технологическому и функциональному признакам. Цифровые и аналоговые микросхемы. Полупроводниковые запоминающие устройства и микропроцессоры.

Тема 2.8. Приборы с зарядовой связью. Принцип действия, основные параметры и области применения.

Тема 2.9. 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.

Тема 2.10. Термоэлектрические и гальваномагнитные полупроводниковые приборы. Твердотельные датчики, включая микроэлектронные преобразователи информации.

## Литература

1. Колосницын Б.С., Степанов А.А. Полупроводниковые приборы микро- и наноэлектроники. Мн.: БГУИР, 2018. – 196.
2. Колосницын Б.С. Мощные и СВЧ полупроводниковые приборы. Мн.: БГУИР, 2008. – 143.
3. Колосницын Б.С. Элементы интегральных схем. Физические основы. – Мн.: БГУИР, 2001. – 138 с.
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. Абрамов И.И. Моделирование физических процессов в элементах кремниевых интегральных микросхем. – Мн.: БГУ, 1999. – 189 с.

7. Колосницын Б.С. Электронные приборы на основе полупроводниковых соединений. – Мн.: БГУИР, 2006 г. – 102 с.
8. Основы электроники и цифровой схемотехники: учебное пособие / Н. В. Суханова. - Воронеж : ВГУИТ, 2017. - 95 с.
9. Основы силовой электроники: от азов к вершинам мастерства / Шустов М. А. - Москва : Наука и техника, 2017. - 335 с.
10. Твердотельная электроника: учебное пособие для высших учебных заведений по направлению подготовки бакалавров, магистров 010700 "Физика" и специальности 010701 "Физика" / В. Гуртов. - 3-е изд., дополненное. - Москва : Техносфера, 2008. - 510, [1] с.

### Раздел 3. Нанoeлектроника и приборы на квантовых эффектах

Тема 3.1. Квантовое ограничение и основные типы низкоразмерных структур – квантовые точки, шнуры, пленки. Туннелирование. Баллистический транспорт. Спиновые эффекты.

Тема 3.2. Элементы низкоразмерных структур – свободная поверхность и границы раздела. Сверхрешетки. Моделирование атомных конфигураций в наноструктурах.

Тема 3.3. Структуры с квантовым ограничением, индуцированным внутренним электрическим полем – периодические квантовые колодцы, Модуляционно-легированные структуры, дельта-легированные структуры.

Тема 3.4. Структуры с квантовым ограничением, индуцированным внутренним электрическим полем – МОП-структуры, структуры с расщепленным электродом.

Тема 3.5. 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.

Тема 3.6. Материалы с естественным наноструктурированием. Пористый кремний, пористые оксиды, углеродные наноструктуры фуллерены, графен, нанотрубки.

Тема 3.7. Особенности переноса носителей заряда в наноразмерных структурах – баллистический транспорт носителей заряда. Квантование проводимости в структурах с баллистическим транспортом. Электрическое сопротивление низкоразмерного многополюсника. Влияние магнитного поля

на транспорт носителей заряда. Эффект Ааронова-Бома. Квантовый эффект Холла: интегральный и дробный.

Тема 3.8. Одноэлектронное туннелирование в условиях кулоновской блокады. Явления в однобарьерной и двухбарьерной структурах. Сотуннелирование. Резонансное туннелирование через квантовый колодец.

Тема 3.9. Электронные приборы на квантовых эффектах. Интерференционные транзисторы. Приборы на эффекте одноэлектронного туннелирования. Диоды и транзисторы на эффекте резонансного туннелирования.

Тема 3.10. Основы спинтроники. Эффект гигантского магнитосопротивления. Туннельное магнитосопротивления. Спинтронные приборы – датчики магнитного поля, элементы памяти.

### Литература

1. Борисенко В. Е., Воробьева А. И., Уткина Е. А. Нанoeлектроника: теория и практика. – М.: Бином, 2013. – 366 с.
2. Borisenko V.E., Ossicini S. What is What in the Nanoworld (Wiley-VCH, Weinheim, 2004).
3. Абрамов И.И., Новик Е.Г. Численное моделирование металлических одноэлектронных транзисторов. – Мн.: Бестпринт, 2000. – 164 с.

### Раздел 4. Технологические процессы производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем

Тема 4.1. Определение кристаллографической ориентации пластин полупроводников. Ориентированная резка, шлифовка и полировка пластин.

Тема 4.2. Химическое травление и химическая полировка германия, кремния и арсенида галлия. Химико-механическая полировка. Финишная очистка пластин. Методы контроля качества очистки.

Тема 4.3. Легирование полупроводников высокотемпературной диффузией примесей. Физические основы и основные уравнения. Граничные условия и расчетные формулы для наиболее важных частных случаев диффузии. Практические методы проведения диффузионных процессов.

Тема 4.4. Легирование полупроводников ионной имплантацией. Профили распределения имплантированной примеси и дефектов. Рекристаллизация имплантированных слоев и отжиг дефектов.



Тема 4.5. Плазмохимические и ионно-плазменные методы обработки полупроводниковых, диэлектрических и металлических слоев. Дефекты, вносимые электронно-ионной обработкой, их устранение.

Тема 4.6. Формирование эпитаксиальных слоев. Распределение примесей и дефекты в эпитаксиальных слоях.

Тема 4.7. Формирование оксидных слоев. Термическое окисление кремния. Анодное окисление металлов и полупроводников.

Тема 4.8. Формирование тонких пленок: термическим испарением в вакууме, ионным и ионно-плазменным распылением, химическим осаждением из газовой фазы. Оборудование для получения и контроля параметров тонких пленок.

Тема 4.9. Формирование топологии элементов полупроводниковых приборов и интегральных микросхем: фотолитография, электронно-лучевая литография и рентгенография. Травление металлов, полупроводников, диэлектриков: жидкостное, плазменное, ионное, ионно-плазменное.

Тема 4.10. Основы конструирования полупроводниковых интегральных микросхем. Методы изоляции элементов. Изопланарная технология, эпоксидный процесс, технология «кремний на изоляторе».

Тема 4.11. Типы интегральных микросхем в зависимости от технологии их изготовления. Полупроводниковые интегральные микросхемы. Тонкопленочные интегральные микросхемы. Толстопленочные интегральные микросхемы. Гибридные интегральные микросхемы.

Тема 4.12. 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.

## Литература

1. Технология СБИС: в 2 т. / Под ред. С.Зи. – М.: Мир, 1986.
2. Проектирование СБИС / М. Ватанабэ, К. Асада, К. Кани, Т. Оцуки. – М.: Мир, 1988.
3. Киносита К., Асада К., Карацу О. Логическое проектирование СБИС. – М.: Мир, 1988.
4. Казённов Г.Г., Соколов А.Г. Принципы и методология построения САПР БИС. – М.: Высш. шк., 1990. – 142 с.

5. 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.
6. Родионов Ю.А. Литография в производстве интегральных микросхем. – Мн. Дизайн ПРО, 1998.
7. Казённов Г.Г., Соколов А.Г. Основы построения САПР и ВСТПП. – М.: Высш. шк., 1989. – 200 с.
8. Основы проектирования интегральных схем и систем / Г. Г. Казеннов. - Москва : Бином. Лаборатория знаний, 2009. - 295 с.
9. Анализ и преобразование структурных описаний СБИС / Д.И.Черемисинов. - Минск : Белорусская наука, 2006. - 274, [1] с.

## Раздел 5. Обеспечение качества и надежности полупроводниковых приборов и интегральных микросхем

Тема 5.1. Организация контроля качества полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. Методы измерения статических, динамических, импульсных и шумовых параметров полупроводниковых приборов.

Тема 5.2. Виды производственных испытаний. Количественные характеристики надежности. Эксплуатационная надежность. Надежность элементов интегральных микросхем.

Тема 5.3. Классификация и основные виды отказов. Механизмы отказов. Статистические и физические методы анализа и прогнозирования отказов.

Тема 5.4. Действие радиации на полупроводниковые приборы и интегральные микросхемы.

## 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.
4. Физика отказов полупроводниковых приборов и интегральных схем: пособие для студентов учреждения высшего образования, обучающихся по специальностям 1-31 04 02 "Радиофизика", 1-31 04 03

"Физическая электроника" / В. М. Борздов, В. М. Молофеев, А. Н. Сетун. - Минск : БГУ, 2015. - 154, [1] с.

5. Обеспечение и повышение надежности полупроводниковых приборов и интегральных схем в процессе серийного производства / М.И.Горлов, Л.П.Ануфриев, О.Л.Бордюжа. - Мн. : Изд-во НПО "Интеграл", 1997. - 389 с.

## Раздел 6. Автоматизированное проектирование интегральных микросхем и технологии их изготовления

Тема 6.1. Основы автоматизированного проектирования полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. Архитектурное проектирование. Функционально-логическое проектирование. Схемотехническое проектирование. Конструкторско-технологическое проектирование. Системы автоматизированного проектирования и их структура.

Тема 6.2. 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.

Тема 6.3. Компьютерное проектирование приборов и систем микроэлектроники. Уровни компьютерного проектирования приборов и систем микроэлектроники. Характеристики основных программных пакетов схемотехнического проектирования.

Тема 6.4. 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.

Тема 6.5. Статистический анализ и оптимизация технологических параметров изготовления изделий микроэлектроники. Основные положения решения задачи статистического анализа и оптимизации технологии изготовления интегральных микросхем. 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.

## Литература

1. МОП-СБИС. Моделирование элементов и технологических процессов/ Подред. П.Антонетти и др. - М.: Радио и связь.- 1989.
2. Нелаев В.В., Стемпицкий В.Р. Учебно-методическое пособие “Статистический анализ и оптимизация технологических параметров изготовления интегральных микросхем”. Мн. БГУИР, 2002.- 39 сс. (в том числе в электрон-ном виде)
3. Нелаев В.В., Стемпицкий В.Р. Учебное пособие (с грифом Минобра РБ) “Основы САПР в микроэлектронике. Моделирование технологии и прибора”. Мн. БГУИР, 2008.- 220 сс. (в том числе в электронном виде).
4. Нелаев В.В., Стемпицкий В.Р. Учебное пособие “Технологическое проектирование интегральных микросхем. Программа SSUPREM4”.- Минск, БГУИР, 2004.- 102 стр. (в том числе в электронном виде).
5. Нелаев В.В., Стемпицкий В.Р. Учебное пособие “Работа в среде пакета ATHENA для проектирования технологии интегральных микросхем”.- Минск, БГУИР, 2005.- 137 стр. (в том числе в электронном виде).
6. Найбук М.Н., Нелаев В.В. Методическое пособие “Программный модуль GUI-SUPREM III для проектирования технологии интегральных схем”. Мн. БГУИР, 2007.- 43 сс. (в том числе в электронном виде).
7. Моделирование полупроводниковых приборов и технологических процессов/ Под ред. Д. Миллера. Моделирование полупроводниковых приборов. - М.: Радио и связь.-1989.
8. Antoniadis D.A., Hansen S.E., Dutton R.W. SUPREM II – A program for IC process modeling and simulation / Stanford Electronics Lab.– Tech. Report.– 5019-2.– 1978.
9. Бубенников, А. Н. Физико-технологическое проектирование биполярных элементов кремниевых БИС. А. Н. Бубенников, А. Д. Садовников. - М. Радио и связь, 1991. – 288 с.
10. Нелаев В.В., Стемпицкий В.Р. Учебное пособие “Технологическое проектирование интегральных схем. Программа SSUPREM IV”. Мн. БГУИР. 2004. 102 с.