

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе  
и социальным вопросам

А. А. Хмыль

« 26 » 05 2014 г.

ПРОГРАММА

вступительного экзамена в магистратуру по специальности 1-41 80 01  
«Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты,  
микро- и наноэлектроника и приборы на квантовых эффектах»

Минск, 2014

Программа составлена на основании типовых учебных программ дисциплин «Полупроводниковые приборы и элементы интегральных микросхем»; «Физика твердого тела»; «Наноэлектроника», «Информационные технологии в проектировании интегральных микросхем».

#### СОСТАВИТЕЛИ:

Борисенко В.Е. д.ф.-м.н, профессор, зав. кафедрой МНЭ; Колосницын Б.С., к.т.н., профессор, профессор каф. МНЭ; Петрович В.А. к.т.н., доцент, доцент каф. МНЭ; Котов Д.А. к.т.н., доцент каф. МНЭ; Мигас Д.Б., д.ф.-м.н., профессор каф.МНЭ.

#### РЕКОМЕНДОВАНА К УТВЕРЖДЕНИЮ

Кафедрой микро- и наноэлектроники учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (протокол № 11 от « 26 » мая 2014 г.)

Заведующий кафедрой МНЭ

\_\_\_\_\_

В.Е.Борисенко

## **Раздел 1. Физика твердого тела**

Тема 1. Природа химической связи в твердых телах

Структура кристаллов. Идеальные и реальные кристаллы. Дефекты в кристаллах. Свойства основных материалов микроэлектроники: Si, GaAs, Ge.

Тема 2. Зонная теория твердого тела

Энергетические спектры электронов в металлах, полупроводниках, диэлектриках. Эффективная масса электрона. Собственные и примесные полупроводники. Роль донорных и акцепторных примесей.

Тема 3. Рекомбинация и генерация неосновных 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. Типы генерации.

Тема 4. Электропроводность полупроводников

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

Тема 5. Оптические свойства полупроводников

Поглощение и испускание света в полупроводниках.

Тема 6. Термоэлектрические явления в полупроводниках

Термо- и гальваномагнитные эффекты. Эффект Холла.

Тема 7. Гетеропереходы

Уравнение Пуассона. Контакт металл-полупроводник. Омический и выпрямляющий электронно-дырочный переходы.

## **Раздел 2. Приборы твердотельной электроники**

Тема 1. Полупроводниковые диоды

Основные параметры и характеристики диодов, их зависимость от температуры и режима. Эквивалентные схемы. Импульсные и частотные свойства диодов. Физико-топологические модели диодов. Туннельные и обращенные диоды. Лавинно-пролетные диоды. Диоды Шоттки.

Тема 2. 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. Мощные транзисторы. СВЧ транзисторы.

### Тема 3. Тиристоры

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

### Тема 4. Канальные 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.

### Тема 5. 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 6. Интегральные микросхемы

Классификация интегральных микросхем по конструктивно-технологическому и функциональному признакам. Цифровые и аналоговые микросхемы. Полупроводниковые запоминающие устройства и микропроцессоры. Биполярные ТТЛ, ЭСЛ и И<sup>2</sup>Л-схемы, КНИ с  $p$ - и  $n$ -каналами, КМОП-схемы.

### Тема 7. Приборы с зарядовой связью

Принцип действия, основные параметры и области применения.

### Тема 8. Датчики

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

## Раздел 3. Нанoeлектроника и приборы на квантовых эффектах

### Тема 1. Физические основы нанoeлектроники

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

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

Тема 2. 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. Наноструктурированные материалы – пористый кремний, углеродные нанотрубки.

Тема 3. Особенности переноса носителей заряда в наноразмерных структурах и электронные приборы на их основе

Баллистический и квазibalлистический транспорт. Электрическое сопротивление наноразмерного многополюсника. Квантовый эффект Холла: целочисленный и дробный. Интерференционные транзисторы. Баллистические выпрямители и транзисторы.

Одноэлектронное туннелирование в условиях кулоновской блокады, явления в однобарьерной и двухбарьерной структурах. Электронные приборы на одноэлектронном туннелировании. Резонансное туннелирование. Диоды и транзисторы на эффекте резонансного туннелирования.

Физические основы спинтроники. Эффект гигантского магнитосопротивления. Спин-контролируемое туннелирование носителей заряда. Приборы спинтроники.

#### **Раздел 4. Технология изготовления интегральных микросхем**

Тема 1. Планарная технология

Формирование эпитаксиальных слоев. Термическое окисление кремния. Диффузионное легирование полупроводников. Ионное легирование материалов. Формирование разделительных областей элементов интегральных микросхем.

Тема 2. Формирование пленок металлов, полупроводников и диэлектриков

Нанесение пленок термическим испарением в вакууме, ионным и ионно-плазменным распылением, химическим осаждением из газовой фазы. Химическое и электрохимическое осаждение материалов. Анодное окисление металлов и полупроводников.

Тема 3. Формирование топологии элементов интегральных микросхем

Фотолитография. Электронно-лучевая литография и рентгенография. Жидкостное травление металлов, полупроводников, диэлектриков. Плазмохимические и ионно-плазменные методы обработки полупроводниковых, диэлектрических и металлических слоев.

#### Тема 4. Проектирование конструкции и технологии изготовления интегральных микросхем

Физико-математическое моделирование и проектирование приборов и систем микроэлектроники. Уровни компьютерного проектирования приборов и систем микроэлектроники. Методы и средства компьютерного проектирования приборов и систем микро- и наноэлектроники. Моделирование аналоговых, цифровых и аналого–цифровых схем в среде пакетов PCAD, PSPICE, Design Center, Cadence. Сквозное проектирование технологии/прибора/схемы в среде программного комплекса компании Silvaco. Статистический анализ и оптимизация технологических параметров изготовления изделий микроэлектроники. Локальные и глобальные флуктуации технологических параметров.

#### ЛИТЕРАТУРА

##### К разделу 1

##### Основная

1. Шалимова К.В. Физика полупроводников. – М.: Высшая школа, 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. Аваев Н.А. Основы микроэлектроники. – М.: Сов. Радио, 1991.
5. Поклонский Н.А., Вырко С.А., Поденок С.Л. Статистическая физика полупроводников. Курс лекций. М., КомКнига, 2005, -258 с.

##### Дополнительная

Павлов В.П., Хохлов А.Ф. Физика твердого тела. – М.: Высшая школа, 1985. – 384 с.; Нижний Новгород, НТУ им.Н.И. Лобачевского, 1993.-490с.

1. Уханов Ю.И. Оптические свойства полупроводников. М.: Радио, 1977.
2. Грибковский В.П. Теория поглощения и испускания света в полупроводниках. – Мн.: Наука и техника, 1975.
3. Волчѣк С.А., Петрович В.А. Оптические свойства твердых тел. Лабораторный практикум по курсу «Физика твердого тела», Минск.: БГУИР, 2006.

##### К разделу 2

##### Основная

1. Алексеенко А.Т. Основы микросхемотехники.-М.: Лаборатория базовых знаний, 2004
2. Колосницын Б.С. Элементы интегральных схем. Физические основы. – Мн.: БГУИР, 2001. – 138 с.
3. Колосницын Б.С. Мощные и СВЧ полупроводниковые приборы – Мн.: БГУИР, 2008. -150 с.
4. Абрамов И.И. Лекции по моделированию интегральных схем. Москва – Ижевск: НИЦ РХД, 2005. – 152 с.
5. Шур М. Современные приборы на основе арсенида галлия: пер. с англ. – М.: Мир, 1991. – 632 с.

##### Дополнительная

1. Степаненко И.П. Основы микроэлектроники. –М.: Лаборатория базовых знаний, 2004.
2. Россато 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.

### К разделу 3

#### Основная

1. Борисенко В. Е., Воробьева А. И., Данилюк А. Л. Уткина Е.А. Нанoeлектроника. Теория и практика – М., Бинoм, 2013, 366 с.
2. Borisenko V.E., Ossicini S. What is What in the Nanoworld.- Wiley-VCH, Weinheim, 2012.-601 с.
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.

#### Дополнительная

1. Хакен Х. Квантовополевая теория твердого тела. – М.: Наука, 1980.-240 с.
2. Абрамов И.И., Новик Е.Г. Численное моделирование металлических одноэлектронных транзисторов. – Мн.: Бестпринт, 2000. – 164 с.
3. Ferry D.K., Goodnick S.M. Transport in Nanostructures.-Cambridge University Press. – Cambridge, 1997.
4. Валиев К.А., Кокина А.А. Квантовые компьютеры: надежды и реальности. – Ижевск: НИЦ РХД, 2001. – 352 с.

### К разделу 4

#### Основная

1. Моро У. Микролитография. В 2 т. – М.: Мир, 1990.
2. Микроструктура материалов. Методы исследования и контроля/Д. Брандон, У. Каплан – Москва: Техносфера, 2006.-378 с.
3. Рындин Е.А. Субмикронные интегральные схемы: элементная база и проектирование./Е.А. Рындин, Б.Г.Коноплев. - Таганрог, 2001.-146 с.
4. Нанотехнологии/ С. Пул, Ф.Оуэнс – Москва: Техносфера, 2005-286с.
5. Campbell, S. The science and engineering of microelectronic fabrication./ S. Campbell-New York: Oxford university press, 2001.- 603 p.
6. Разевиг В.Д. Система схемотехнического моделирования и проектирования печатных плат DESIGN CENTER. – М.: Радио и связь, 1996, 268 с.
7. Нелаев В.В., Стемпицкий В.Р. Основы САПР в микроэлектронике. Моделирование технологии и прибора. – Мн.: БГУИР, 2008, 220 с.
8. Нелаев В.В., Стемпицкий В.Р. Проектирование технологии интегральных схем. Программа SSUPREM IV. Учебное пособие. – Мн.: БГУИР, 2004, 102 с.

9. Нелаев В.В., Стемпицкий В.Р. Статистический анализ и оптимизация технологических параметров изготовления интегральных микросхем. Учебно-методическое пособие. – Мн.: БГУИР, 2002, 39 с.

Дополнительная

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. Rabaey, J. Digital Integrated Circuits: A Design Perspective, second edition/ J.Rabaey, A.Chandrakasan, B.Nikolic. – New York: Prentice Hall, 2003. – 747 p.
3. Goddard, W.Handbook of nanoscience, engineering, and technology/W.A. Goddard,D.W.Brenner, S.E.Lyshevski, G.J.Iafrate. – New York: CRC Press, 2003. – 709 p.
4. Bhushan, B.Handbook of nanotechnology. B. Bhushan. – Berlin: Springer-Verlag, 2004. – 1222 p.
5. Аналитическая просвечивающая электронная микроскопия для материаловедения/Д.Синдо, Т.Оикава – Москва: Техносфера, 2005. – 260 с.