

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого»

Институт электронных и информационных систем  
Кафедра физики твердого тела и микроэлектроники

**УТВЕРЖДАЮ**  
Директор ИЭИС проф.  
*С.И. Эминов*  
« 06 » 06 2017 г.

## ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОННОЙ КОМПОНЕНТНОЙ БАЗЫ

Учебный модуль по направлению подготовки  
11.03.04 - Электроника и нанoeлектроника  
Профиль – Микроэлектроника и твердотельная электроника

Рабочая программа

**СОГЛАСОВАНО**

Начальник учебного отдела  
*О.Б. Широколобова*  
« 06 » 06 2017 г.

Разработал  
Профессор кафедры ФТТМ  
*М.Н. Петров*

« 19 » 05 2017 г.

Принято на заседании КФТТМ  
Протокол № 10 от 22.05.2017 г.  
Заведующий кафедрой ФТТМ, проф.  
*Б.И. Селезнев*

## 1 Цели освоения учебного модуля

Целью учебного модуля (УМ) «Основы проектирования и технологии электронной компонентной базы» (ОПТЭКБ) является формирование компетентности студентов по направлению подготовки «Электроника и наноэлектроника» в соответствии с ФГОС ВПО.

В задачу учебного модуля ОПТЭКБ входит обучение студентов общим принципам и подходам проектирования активных и пассивных микроэлектронных компонентов и устройств, в том числе СВЧ диапазона, с использованием современных пакетов 2D- и 3D-прикладных программ, обеспечивающих приборно-технологическое проектирование нового поколения, а также интеграцию этих средств с САПР СБИС. Изучение и освоение типовых базовых технологических процессов производства микроэлектронных компонентов и устройств с использованием современных методов моделирования с применением новейших программных продуктов.

Ведущая идея - знакомство студентов с современными системами приборно-технологического проектирования элементной базы при разработке широкого спектра современных полупроводниковых, оптоэлектронных и СВЧ приборов, включая разнообразные сенсоры. Она базируется на приборно-технологических САПР TCAD, позволяющих моделировать процесс технологического производства СБИС.

## 2 Место учебного модуля в структуре ОП направления подготовки

Учебный модуль «Основы проектирования и технологии электронной компонентной базы» входит в вариативную часть блока 1 учебного плана по направлению подготовки бакалавров 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника» и изучается на 3-м курсе. Изучение УМ базируется на знаниях, полученных студентами при изучении учебных модулей «Информационные технологии, инженерная и компьютерная графика», «Микроэлектроника и твердотельная электроника», «Физика конденсированного состояния», «Прикладная информатика», «Численные методы», преподаваемые в 1÷5 семестрах направления подготовки 11.03.04.

В результате изучения предшествующих модулей и для изучения УМ «Основы проектирования и технологии электронной компонентной базы», обучающиеся должны:

### **знать:**

– основные понятия и методы математического анализа, линейной алгебры, дискретной математики, теории дифференциальных уравнений и элементов теории уравнений математической физики, теории вероятностей и математической статистики, физики конденсированного состояния;

### **уметь:**

– проводить анализ функций, применять математические методы при решении типовых профессиональных задач;

### **владеть:**

– методами решений дифференциальных и алгебраических уравнений, дифференциального и интегрального исчисления, теории вероятностей и математической логики.

Базовые знания, полученные при изучении УМ ОПТЭКБ, используются при освоении модулей ОП направления подготовки 11.03.04, связанных с обработкой информации и моделированием на разных иерархических уровнях проектирования современных микросхем:

- Элементная база сверхбольших интегральных схем;
- Проектирование цифровых устройств;
- Процессы микро- и нанотехнологии;
- Математическое моделирование технологических процессов, полупроводниковых приборов и ИМС.

### 3 Требования к результатам освоения учебного модуля

Процесс изучения УМ направлен на формирование компетенций:

- ОПК-7 способность учитывать современные тенденции развития электроники, измерительной и вычислительной техники, информационных технологий в своей профессиональной деятельности;

- ПК-1 способность строить простейшие физические и математические модели приборов, схем, устройств и установок электроники и нанoeлектроники различного функционального назначения, а также использовать стандартные программные средства их компьютерного моделирования;

- ДПК-1 – способность к разработке и моделированию конструкций и топологий изделий «система в корпусе»;

- ДПК-2 – способность к организации и контролю технологического процесса выпуска изделий микроэлектроники.

В результате изучения дисциплины «Основы проектирования и технологии электронной компонентной базы» студент должен знать, уметь, владеть:

Код компетенции	Уровень освоения компетенции	Знать	Уметь	Владеть
ОПК-7	базовый	основные направления развития современной элементной базы микро- и нанoeлектроники	учитывать современные тенденции развития электроники	
ПК-1	базовый	особенности приборно-технологического моделирования микро- и нанoeлектронных устройств с помощью САПР Sentaurus TCAD	правильно определять необходимые модели для проведения приборно-технологического моделирования	пакетом программ приборно-технологического моделирования Sentaurus TCAD
ДПК-1	базовый	физические процессы в интегральных микро- и нанoeлектронных устройствах - биполярных и МДП приборах; принципы используемые в системах автоматизированного проектирования	применять приобретенные знания для проведения коррекции моделей микро- и нанoeлектронных устройств для компьютерного моделирования с учетом изменения параметров масштабированных структур	методами схемотехнического проектирования на базе CM SPICE с использованием компактных моделей микро- и нанoeлектронных компонентов

Код компетенции	Уровень освоения компетенции	Знать	Уметь	Владеть
ДПК-2	базовый	основные законы построения технологических процессов, основные математические модели технологических процессов	разрабатывать технологические маршруты изготовления электронных и нанoeлектронных приборов	методами математического моделирования технологических процессов с целью их оптимизации

#### 4 Структура и содержание учебного модуля

##### 4.1 Трудоемкость учебного модуля

В структуре УМ выделены следующие учебные элементы модуля (УЭМ) в качестве самостоятельных разделов:

– **УЭМ1** Основные направления развития современной элементной базы микро- и нанoeлектроники.

– **УЭМ2** САПР, СМ и модели, используемые при проектировании элементной базы микро- и нанoeлектроники.

– **УЭМ3** Моделирование технологических процессов формирования элементов микро- и нанoeлектроники на базе Sentaurus TCAD.

– **УЭМ4** Приборный этап проектирования элементной базы микро- и нанoeлектроники на базе Sentaurus TCAD.

– **УЭМ5** Схемотехнический этап проектирования элементной базы микро- и нанoeлектроники на базе СМ АИМ-SPICE. Компактные (SPICE) модели компонентов.

Учебная работа (УР)	Распределение по семестрам	Коды формируемых компетенций
	6 семестр	
Трудоемкость модуля в зачетных единицах (ЗЕ)	9	
Распределение трудоемкости по видам УР в академических часах (АЧ):	324	
1) УЭМ1 Основные направления развития современной элементной базы микро- и нанoeлектроники		
- лекции	14	ОПК-7
- практические занятия	-	
- в т.ч. аудиторная СРС	3	
- внеаудиторная СРС	16	
2) УЭМ2 САПР, СМ и модели, используемые при проектировании элементной базы микро- и нанoeлектроники.		
- лекции	7	ДПК-1
- практические занятия	-	
- в т.ч. аудиторная СРС	-	
- внеаудиторная СРС	16	

Учебная работа (УР)	Распределение по семестрам	Коды формируемых компетенций
3) УЭМ3 Моделирование технологических процессов формирования элементов микро- и нанoeлектроники на базе Sentaurus TCAD.		
- лекции	12	ДПК-1, ДПК-2
- практические занятия	25	
- в т.ч. аудиторная СРС	11	
- внеаудиторная СРС	32	
4) УЭМ4 Приборный этап проектирования элементной базы микро- и нанoeлектроники на базе Sentaurus TCAD.		
- лекции	10	ПК-1, ДПК-1
- практические занятия	24	
- в т.ч. аудиторная СРС	11	
- внеаудиторная СРС	32	
5) УЭМ5 Схемотехнический этап проектирования элементной базы микро- и нанoeлектроники на базе CM AIM-SPICE. Компактные (SPICE) модели компонентов.		
- лекции	11	ПК-1, ДПК-1
- практические занятия	41	
- в т.ч. аудиторная СРС	11	
- внеаудиторная СРС	48	
<b>Аттестация:</b>		
- экзамен	36	

## 4.2 Содержание и структура разделов учебного модуля

### УЭМ1 Основные направления развития современной элементной базы микро- и нанoeлектроники

**1.1 Введение.** Основные задачи, решаемые в процессе развития микроэлектроники. Комплекс средств, обеспечивающих рост функциональных возможностей микроэлектроники. Основные тенденции: от интеграции технологий к функциональной интеграции, интеграции в области системотехники и, наконец, в интеграция знаний.

**1.2 Интегральная микроэлектроника: микропроцессоры и схемы памяти.** Основные термины: микроархитектура, микроконтроллер, процессорное ядро, графическое ядро, многоядерность, кэш-память, ОЗУ, статическая память, технология виртуализации, платформа.

**1.3 Мобильные технологии.** Устройств нового поколения: смартфоны и планшетные ПК, поддерживающие развитие мобильного интернета. Современные технология управления электропитанием.

**1.4 Мультимедийные технологии.** Основные компоненты: графический процессор. Стандарт IrDA — передача данных с использованием ИК излучения. Современный 3D-контент. Способы отображения 3D-контента. Использование DSP процессора для сжатия потока данных (аудио). Стандарт VDSL.

**1.5 СВЧ электроника.** Pin-диоды и диоды Шоттки. НЕМТ транзисторы. Гетероструктурные биполярные транзисторы на основе сплава  $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$ .

**1.6 Силовая электроника.** Классификация силовых полупроводниковых приборов. Тиристоры. Мощные МОП транзисторы. SmartFET. Диоды на SiC и GaN. Мощные биполярные транзисторы. Биполярный транзистор с изолированным затвором (IGBT). Интеллектуальные силовые ИС. Мощные приборы для автомобильной электроники.

**1.7 Кремниевая фотоника.** Основные компоненты: источники излучения, приемники излучения, волоконные линии связи (оптические волноводы). коммутаторы.

Оптические разъемы. Технологии Light Peak и Silicon Photonics Link. Гибридный кремниевый лазер с электрической накачкой.

**1.8 Системы на кристалле.** Терминология (SOC, SoPC, PSoC, CSoC). Различные виды интеграции. CMOS+Flash. CMOS+EEPROM. SiGe/BiCMOS. Микропроцессорные системы на кристалле: три типа цифровых системных блоков: процессор, память и логика. Особенности проектирования. Использование IP-блоков (ядер). Программные (soft) и аппаратные (hard) варианты блоков. VC (Virtual Component).

**1.9 Индикаторы и осветительные лампы на базе светодиодов.** Светодиоды (СД). Основные материалы, используемые для создания СД. СД видимого спектра. Источники белого света на основе светодиодов: гибридные и RGB. Колориметрия. Полупроводниковые лазеры.

**1.10 Солнечная энергетика.** Системы преобразования солнечной энергии. Элементная база. Солнечные коллекторы.

**1.11 Элементная база цифровых камер.** ПЗС и КМОП ячейки. Активный пиксел. Способы реализации кремниевой фотопленки: Шаблон Байера. RAW -универсальный формат сохранения снимков.

**1.12 Специализированные ИС для жидкокристаллических дисплеев.** МОП транзисторы на поликристаллическом и аморфном кремнии.

**1.13 Цифровое телевидение.** Цифровое телевидение как отрасль информатики. Основные этапы твердотельной революции в телевидении. Проект Smart TV. Декодирование и воспроизведение HD-видео (видео высокой четкости) и аудио высокого класса. Обработка 3D-графики.

**1.14 Микроэлектромеханические системы (МЭМС, MEMS).** Измерительные устройства - сенсоры: акселерометры, напряжений и давления, гироскопы. Исполнительные устройства - актуаторы. Микрокапиллярные устройства. Биомедицинские имплантаты.

**УЭМ2 САПР, СМ и модели, используемые при проектировании элементной базы микро- и нанoeлектроники**

**2.1 Введение.** Два основных направления развития индустрии производства микросхем. Базовые концепции построения современных САПР: имитационное моделирование и многоуровневое (иерархическое) проектирование.

**2.2 Суть имитационного моделирования.** Задачи, решаемые с помощью имитационного моделирования. Модели. Свойства моделей.

**2.3 Иерархия СБИС.** Уровни проектирования: кремниевый, транзисторный, вентиляционный, регистровый, микропроцессорный, системный.

**2.4 Виды моделирования и соответствующие им примитивы.** Разновидности иерархического проектирования. Нисходящее проектирование. Восходящее проектирование. Многоуровневое моделирование. Макромодели. Библиотечный метод проектирования. Преимущества иерархического подхода

**2.5 Системный подход к моделированию.** Детерминистский подход. Системный подход. Основные понятия общей теории систем. Параметры системы. Задачи анализа и синтеза объекта. Оптимизация качества проектируемого объекта.

**2.6 Классификация моделей.** Общая классификация моделей. Модели схемотехнического уровня. Детерминированные и стохастические модели. Статические и динамические модели. Непрерывные и дискретные модели. Распределенные, сосредоточенные и информационные модели.

**2.7 Экономичность и универсальность имитационных моделей.** Задачи схемотехнического моделирования СБИС

**УЭМ3 Моделирование технологических процессов формирования элементов микро- и нанoeлектроники на базе Sentaurus TCAD**

**3.1 Введение. Суть приборно-технологического моделирования полупроводниковых структур микро- и нанoeлектроники.** Роль и место TCAD в системах сквозного проектирования изделий электронной техники. История развития, фирмы-разработчики и основные поколения программ TCAD.

**3.2. Целостное представление о технологическом процессе.** Взаимовлияние операций в целостном технологическом процессе. Возможности и основные направления развития средств приборно-технологического моделирования. Задачи, решаемые с помощью Sentaurus Process, и основы моделирования технологического процесса. Концепция виртуального производства с использованием Sentaurus TCAD.

**3.3 Базовые модули САПР Sentaurus TCAD для проектирования технологии.** Программный продукт (Sentaurus Process), используемый для моделирования всех этапов стандартного технологического процесса: диффузии, имплантации (включая метод Монте-Карло), окисления, травления, осаждения и силицидации в одно- двух- и трехмерном измерении для кремния и сложных полупроводников. Возможность моделирование технологических процессов с помощью модуля TSUPREM-4. Модуль Sentaurus Structure Editor. Три рабочих режима: 2D, 3D редактирование прибора и 3D эмуляция процесса.

Модули Ligament Layout Editor и Ligament Flow Editor. Возможности Ligament Layout Editor и правила создания эскиза фотошаблонов. Возможности Ligament Flow Editor и правила создания модели технологического процесса.

**3.4 Математические модели технологических процессов. Процесс термического окисления кремния.** Особенности окисления в реальном технологическом процессе. Начальный этап окисления. Тонкие пленки. Упругие напряжения и переходный слой. Структурные модели. Модели на основе учета упругих напряжений. Кинетические модели. Электрохимические модели. Окисление в присутствии хлора или влаги. Окисление поликремния. Двумерные модели окисления. Основные этапы численного моделирования процесса окисления. Аналитические модели двумерного окисления. Численное моделирование двумерного окисления.

**3.5 Математические модели технологических процессов. Процесс эпитаксиального наращивания.** Планарно-эпитаксиальная технология - основа производства современных ИС. Процессы жидкофазной эпитаксии. Процессы газофазной эпитаксии. Метод конденсации осаждаемых компонентов. Метод диссоциации и восстановления химических соединений. Силановый метод. Хлоридный метод. Метод газотранспортных химических реакций.

Моделирование процесса эпитаксиального наращивания с помощью модуля Sentaurus Process.

**3.6 Математические модели технологических процессов. Ионная имплантация.** Теория торможения ионов. Вычисление пробега иона и его проекции. Профили распределения внедренных ионов. Нормальное распределение. Асимметричное распределение Гаусса. Распределение Пирсона-IV. Диффузионное приближение. Расчет распределения примеси с использованием уравнения Больцмана. Метод Монте-Карло. Эффект каналирования. Аппроксимации распределения ионов, учитывающие эффект каналирования.

Распределение примеси в интегральных структурах. Системы координат при моделировании ионной имплантации. Учет распыления мишени. Боковое уширение профиля легирования.

Радиационные дефекты. Природа дефектов. Аморфизация. Распределение дефектов по глубине.

Быстрый термический отжиг. Низкотемпературный отжиг.

**3.7 Математические модели технологических процессов. Диффузия примесей.** Особенности диффузионного процесса в кремнии. Уравнения диффузии. Коэффициент

самодиффузии кремния. Коэффициент диффузии примесей по вакансиям. Вакансионно-междоузельный механизм диффузии. Обобщенная модель связанной диффузии.

Примесная диффузия в условиях квазиравновесия. Кластеризация и преципитация примеси.

Неравновесная диффузия (диффузия фосфора). Феноменологические вакансионные модели. Аналитическая модель. Модель просачивания.

Совместная диффузия двух примесей. Диффузия в поликристаллическом кремнии. Численное моделирование диффузии.

**3.8 Математические модели технологических процессов. Травление и осаждение слоев.** Особенности технологических операций. Изотропное и анизотропное травление. Алгоритм струны в моделировании травления и осаждения. Моделирование процесса осаждения. Параметры численных моделей для расчета травления и осаждения.

**3.9 Разработка технологических маршрутов изготовления микро- и нанoeлектронных схем с использованием модуля Synopsys Sentaurus Process. Моделирование технологического процесса изготовления МОП транзистора.** Задание начальной двумерной сетки. Настройка области моделирования. Инициализация. Ионная имплантация. Выращивание подзатворного окисла. Создание поликремниевого затвора. Работа с масками. Окисление поликремния. Формирование контактных площадок. Сохранение всей структуры. Сохранение одномерных разрезов.

**3.10 Разработка технологических маршрутов изготовления микро- и нанoeлектронных схем с использованием модуля Synopsys Sentaurus Process. Моделирование технологического процесса изготовления биполярного транзистора.** Двухмерное (2D) моделирование. Определение подложки. Формирование масок (шаблонов для фотолитографии). Создание скрытого слоя и разгонка примеси. Нарастивание эпитаксиального слоя. Создание «глубокого» контакта к скрытому слою и разгонка. Создание базы - ионная имплантация бора с последующей разгонкой. Создание эмиттера - ионная имплантация мышьяка и активация. Осаждение алюминия. Травление алюминия. Формирование контактных площадок. Сохранение всей структуры. Сохранение одномерных разрезов.

**УЭМ4 Приборный этап проектирования элементной базы микро- и нанoeлектроники на базе Sentaurus TCAD**

**4.1 Модули системы Sentaurus TCAD, предназначенные для моделирования компонентной базы.** Модуль Sentaurus Device – программа, предназначенная для двух- и трехмерного расчета широкого спектра полупроводниковых приборов: от нанометровых МДП-транзисторов до СВЧ и мощных биполярных структур, а также структур на карбиде кремния, гомо- и гетероструктур на соединениях материалов III - V группы. Дополнительные возможности - многомерное моделирование дискретных полупроводниковых приборов и приборов, соединенных в схему на базе четырех типов компактных (схемотехнических) моделей (модуль CompactModels): SPICE модели версии Berkley 3F5, модели МДП-транзистора версий BSIM3v3.2, BSIM4.1.0, и BSIMPD2.2, а также пользовательские модели.

**4.2 Модуль Sentaurus Device.** Входной командный файл Sentaurus Device. Секция File. Секция Electrode. Секция Physics. Секция Plot. Секция Math. Секция Solve. Запуск Sentaurus Device. Результаты расчета.

**4.3 Модуль Sentaurus Inspect.** Запуск Inspect. Загрузка наборов данных. Форматы файлов. Отображение наборов данных. Библиотека скриптов.

**4.4 Графическая оболочка Sentaurus Workbench.** Sentaurus Workbench – автоматизированное рабочее место для построения и редактирования сложных проектов, организации вычислительного процесса внутри проектов и директорий и интеграции работы с программными пакетами. Запуск Sentaurus Workbench. Понятие проекта. Запуск проектов. Отображение результатов моделирования. Выбор узлов. Удаление проектов.

Создание проектов. Создание маршрута модулей. Сохранение проектов. Выполнение экспериментов. Добавление параметров. Создание множества экспериментов. Предварительная обработка и запуск проектов.

**4.5 Приборное моделирование микроразмерных транзисторов. Диффузионно-дрейфовая модель.** Методы численного моделирования полупроводниковых приборов. Диффузионно-дрейфовая модель переноса заряда в полупроводнике. Фундаментальная система уравнений (ФСУ) полупроводника. Модели физических процессов, используемых при формировании ФСУ. Модели рекомбинации-генерации Шокли–Рида–Холла, Оже-рекомбинации. Модели подвижности. Модели лавинного пробоя. Основные варианты независимых переменных, используемых при численном решении ФСУ. Постановка задачи численного решения системы ФСУ. Основные алгоритмы, используемые для дискретизации базовых уравнений. Метод конечных разностей (МКР). Метод конечных элементов (МКЭ). Триангуляция Делоне.

**4.6 Приборное моделирование наноразмерных транзисторов. Гидродинамическая модель.** Особенности приборного моделирования наноразмерных транзисторов. Ограничения диффузионно-дрейфовой модели. Базовая система уравнений гидродинамической модели. Описание гидродинамической модели в командном файле Sentaurus Device. Коррекция моделей физических процессов при переходе к гидродинамической модели. Учета влияния саморазогрева прибора. Формула *Ван Дорта* для учета эффекта квантования энергии носителей.

**УЭМ5 Схемотехнический этап проектирования элементной базы микро- и нанoeлектроники на базе СМ АИМ-SPICE. Компактные (SPICE) модели компонентов**

**5.1 Задачи схемотехнического моделирования.** Отличие компактных моделей от приборно-технологических моделей (ПТ). Типы компактных моделей. Формальные модели. Физические модели. Разновидности физических моделей – SPICE модели. Четыре поколения компактных моделей.

**5.2 Введение в СМ SPICE.** Основные этапы развития СМ SPICE. Анализ SPICE-подобных систем моделирования. Структура СМ SPICE. Принцип работы. Решение систем дифференциальных уравнений. Формирование схемных уравнений. Моделирование схемы в частотной области (малосигнальный анализ). Особенности SPICE-подобных СМ третьего поколения. АИМ-SPICE: ликбез.

**5.3 Модели компонентов с двумя выводами.** p-n – переходы. p-n - переход в равновесном состоянии. Вольтамперная характеристика идеального диода на p-n переходе. Учет эффектов, имеющих место в реальном диоде. Емкость и малосигнальная эквивалентная схема. Реализация SPICE модели диода на p-n переходе.

Переходы металл-полупроводник. Барьер Шоттки. Омические контакты.

Конденсатор на базе структуры металл-диэлектрик-полупроводник. Заряд на поверхности раздела диэлектрик-полупроводник. Пороговое напряжение. Емкость МДП-структуры. Обобщенная зарядоуправляемая модель МДП-структуры.

**5.4 Модели биполярных транзисторов.** Основы работы биполярного транзистора. Моделирование биполярного транзистора. Модель Эберса-Молла. Модель Гуммеля-Пуна. Моделирование работы биполярного транзистора в режиме малого сигнала. Реализация модели биполярного в СМ АИМ-Spice.

**5.5 Модели полевых транзисторов.** Основы работы полевых транзисторов. МОП транзистор. Полевой транзистор на GaAs с барьером Шоттки. Тонкопленочный полевой транзистор на аморфном кремнии. Тонкопленочный полевой транзистор на поли-Si.

Базовые модели МОП транзисторов. Аппроксимация плавного канала. Модель Мейера. Простая зарядоуправляемая модель. Модель, учитывающая насыщение скорости дрейфа. Сравнение основных моделей МОП транзисторов. Реализация компактных моделей МОП транзистора в программе SPICE.

Основные модели полевого транзистора на GaAs с барьером Шоттки. Модель Шокли. Модели, учитывающие насыщение дрейфовой скорости. Реализация основных моделей ПТШ в SPICE.

#### 4.3 Темы практических занятий

Номер раздела УМ	Наименование тем практических занятий	Трудоемкость, ак. час
3.1	Моделирование технологических процессов в среде SentaurusTCAD. Моделирование технологических параметров микро- и нанопереходов на базе основных оболочек и подсистем SentaurusTCAD.	3
3.2	Моделирование технологического процесса окисления в среде модуля Sentaurus Process.	2
3.3	Моделирование технологического процесса эпитаксии в среде модуля Sentaurus Process.	2
3.4	Моделирование технологического процесса ионной имплантации в среде модуля Sentaurus Process.	3
3.5	Моделирование технологических маршрутов в программе Sentaurus Process в одномерном (1D) приближении.	3
3.6	Моделирование технологического маршрута двумерной структуры МОП-транзисторов.	3
3.7	Технологическое моделирование n-МОП структуры с использованием различных моделей имплантации.	3
3.8	Моделирование технологического маршрута создания КМОП-структуры в одномерном (1D) приближении с использованием модуля Sentaurus Process.	3
3.9	Моделирование технологического маршрута создания КМОП-структуры в двухмерном (2D) приближении с использованием модуля Sentaurus Process	3
4.1	Расчет напряжения пробоя элементов интегральных схем с использованием модулей SProcess и SDevice пакета Sentaurus TCAD.	3
	Расчет пробивного напряжения p-n-перехода с плавающими кольцами.	3
4.2	Расчет статических и малосигнальных параметров биполярного транзистора с использованием модуля SDevice.	3
4.3	Расчет характеристик МОП - транзистора с использованием интегральной среды Sentaurus Workbench пакета Sentaurus TCAD.	3
	Расчет полупроводникового резистора на полуизолирующей подложке GaAs с использованием модулей Sentaurus Structure Editor, Mesh и SDevice пакета Sentaurus TCAD.	3
4.4	Моделирование диода Шоттки на подложке GaAs с использованием интегральной среды Sentaurus Workbench пакета Sentaurus TCAD.	3
	Моделирование полевого транзистора с барьером Шоттки на подложке GaAs с использованием интегральной среды Sentaurus Workbench.	3
	Сквозное моделирование электрофизических характеристик	3

Номер раздела УМ	Наименование тем практических занятий	Трудоемкость, ак. час
	кремниевых КМОП-структур в среде модуля Sentaurus Workbench.	
5.3	Практикум по моделированию диодов. Моделирование ВАХ диода. Расчет температурных зависимостей диодных характеристик.	2
	Практикум по моделированию схем на диодах. Моделирование простого стабилизатора напряжения.	2
	Практикум по моделированию схем на диодах. Расчет температурной зависимости стабилизируемого напряжения.	3
	Практикум по моделированию диодов. Сравнение процесса переключения обычного диода на $p-n$ -переходе с диодом Шоттки. Расчет вольт-фарадной характеристики диода.	3
	Практикум по моделированию схем на диодах. Проверка правильности функционирования логических схем (2И-НЕ, 2ИЛИ-НЕ и других) на диодах.	2
5.4	Практикум по моделированию биполярных транзисторов. Моделирование ВАХ биполярного транзистора	2
	Практикум по моделированию биполярных транзисторов. Расчет зависимости коэффициента усиления тока в схеме с ОЭ от режима работы.	3
	Практикум по моделированию биполярных транзисторов. Расчет АЧХ усилителя тока.	3
	Практикум по моделированию биполярных транзисторов. Моделирование вентиля на эмиттерно-связанной логике.	3
	Практикум по моделированию биполярных транзисторов. Рассчитайте АЧХ усилителя на биполярном транзисторе для трех основных схем включения: с общим эмиттером, общей базой и общим коллектором.	3
5.5	Практикум по моделированию МОП-транзисторов. Моделирование ВАХ МОП-транзистора для двух типов моделей.	3
	Практикум по моделированию схем на МОП-транзисторах. Реализация двух алгоритмов расчета таблицы истинности цифровых ветилей	3
	Практикум по моделированию схем на МОП-транзисторах. Расчет передаточной функции инвертора.	3
	Практикум по моделированию схем на МОП-транзисторах. Расчет быстродействия ветилей	3
	Практикум по моделированию схем на МОП-транзисторах. Расчет потребляемой мощности вентиля.	3

#### 4.4 Организация изучения учебного модуля

Методические рекомендации по организации изучения УМ с учетом использования в учебном процессе активных и интерактивных форм проведения учебных занятий даются в приложении А.

#### 5 Контроль и оценка качества освоения учебного модуля

Контроль качества освоения студентами УМ и его составляющих осуществляется непрерывно в течение всего периода обучения с использованием балльно-рейтинговой

системы (БРС), являющейся обязательной к использованию всеми структурными подразделениями университета.

Для оценки качества освоения модуля используются формы контроля: текущий – регулярно в течение всего семестра, рубежный (после освоения каждого УЭМ) и семестровый (экзамен) – по окончании изучения УМ.

Рубежная аттестация на 9 неделе проводится по результатам рубежного контроля по учебным элементам: УЭМ1, УЭМ2, УЭМ3, УЭМ4. Пороговому уровню соответствует 100 баллов, максимальное количество баллов – 200.

Рубежный контроль по УЭМ4 и УЭМ5 проходит на 18 неделе. Пороговому уровню соответствует 100 баллов, максимальное количество баллов – 200.

Максимальное количество баллов, получаемое на экзамене – 50. Максимальное количество баллов по учебному модулю – 450.

Содержание видов контроля и их график отражены в технологической карте учебного модуля (приложение Б).

Оценка качества освоения учебного модуля осуществляется с использованием фонда оценочных средств, разработанного для данного модуля, по всем формам контроля в соответствии с Положением «Об организации учебного процесса по основным образовательным программам высшего профессионального образования» и Положением «О фонде оценочных средств для проведения текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации студентов и итоговой аттестации выпускников».

В качестве оценочных средств на протяжении семестра используются: практические занятия, опрос, экзамен.

## **6 Учебно-методическое и информационное обеспечение**

Учебно-методическое и информационное обеспечение учебного модуля представлено Картой учебно-методического обеспечения (приложение Г).

## **7 Материально-техническое обеспечение учебного модуля**

Для осуществления образовательного процесса по модулю используется лекционная аудитория, оборудованная мультимедийными средствами, а также вычислительный класс с лицензионным программным пакетом Sentaurus TCAD и учебные версии системы схемотехнического моделирования (СМ) PSPICE и AIM-SPICE.

### **Приложения (обязательные):**

А – Методические рекомендации по организации изучения учебного модуля

Б – Технологическая карта

В – Паспорта компетенций

Г – Карта учебно-методического обеспечения УМ

## **Приложение А** (обязательное)

### **Методические рекомендации по организации изучения учебного модуля «Основы проектирования и технологии электронной компонентной базы»**

Учебный модуль «Основы проектирования и технологии электронной компонентной базы» разделен на пять учебных элементов модуля (УЭМ): «Основные направления развития современной элементной базы микро- и нанoeлектроники», «САПР, СМ и модели, используемые при проектировании элементной базы микро- и нанoeлектроники», «Моделирование технологических процессов формирования элементов микро- и нанoeлектроники на базе Sentaurus TCAD», «Приборный этап проектирования элементной базы микро- и нанoeлектроники на базе Sentaurus TCAD», «Схемотехнический этап проектирования элементной базы микро- и нанoeлектроники на базе СМ АИМ-SPICE».

Каждый из УЭМ состоит из взаимосвязанных разделов, по которым предусмотрены лекционные и практические (или самостоятельные) занятия. Первый учебный элемент посвящен обзору основных сфер применения современной элементной базы микроэлектроники. Второй УЭМ включает занятия, направленные на знакомство студентов с системами проектирования современной элементной базы. Третий УЭМ знакомит студентов с базовыми технологическими процессами и их моделированием с помощью САПР Sentaurus TCAD. Четвертый модуль посвящен изучению реализации приборных моделей в модуле SDevice приборно-технологического САПР Sentaurus TCAD. Пятый модуль знакомит студентов с принципами построения компактных (SPICE) моделей на базе изучения физики работы полупроводниковых компонентов.

В таблице А.1 отражены разделы модуля, технологии и формы проведения занятий, задания по самостоятельной работе студентам и ссылки на необходимую литературу.

#### **А.1 Методические рекомендации по теоретической части учебного модуля**

Теоретическая часть модуля направлена на формирование системы знаний, обеспечивающих технологическую, приборную и программную реализацию задач, предназначенных для моделирования и проектирования микро- и нанoeлектронных приборов.

Основное содержание теоретической части излагается преподавателем на лекционных занятиях, а также усваивается студентом при знакомстве с дополнительной литературой, которая предназначена для более глубокого овладения знаниями основных дидактических единиц соответствующего раздела и указана в таблице А.1.

Как правило, в начале лекции проводится опрос (не более 15 мин.) для экспресс-оценки уровня усвоения теоретического материала студентами. Опрос состоит из набора вопросов, например:

1. За счет чего снижается стоимость полупроводникового производства при использовании TCAD:
  - а) за счет уменьшения числа экспериментов;
  - б) за счет того, что отпадает необходимость ставить эксперименты в процессе разработки нового технологического процесса;
  - в) за счет сокращения затраченного времени;
  - г) за счет уменьшения стоимости обучения и подготовки персонала?
2. В каком виде представлены в TCAD физические модели:
  - а) в виде системы алгебраических уравнений;
  - б) в виде системы нелинейных дифференциальных уравнений;
  - в) в виде системы нелинейных дифференциальных уравнений с соответствующими

- граничными и начальными условиями;  
г) в виде набора значений физических величин.
3. Чем определяется выбор размеров элементов сетки в методе конечных элементов:
- а) достижением приемлемой сходимости и точности расчета;
  - б) затратами времени на вычисление;
  - в) размерами и формой структуры, наличием и величиной градиентов физических параметров, наличием других неоднородностей структуры (например, интерфейсов);
  - г) всеми перечисленными факторами в совокупности?

## **А.2 Методические рекомендации по проведению практических занятий**

Студенты самостоятельно выполняют практические занятия, получая задание и необходимые консультации у преподавателя. Результаты работы оформляются в виде отчетов.

По результатам защиты студентам начисляются баллы. Максимальное количество баллов за выполнение и защиту одного практического занятия – 5 (7) баллов.

Практические занятия считаются выполненными, если студент выполнил и защитил все выполненные работы, набрав при этом минимально необходимую сумму баллов (102 балла). Перечень занятий указан в разделе 4.3 настоящей рабочей программы.

Для выполнения практических занятий по УМ студенты должны пользоваться методическими указаниями: Петров М.Н. Методические указания к практическим занятиям по модулю «Основы проектирования и технологии электронной компонентной базы» [электронный ресурс] / НовГУ им. Ярослава Мудрого. – В. Новгород, 2014. – 65 с.

Методические указания содержат описания алгоритмов, программ, методику и порядок проведения практических занятий, контрольные вопросы.

Практические занятия в рамках УЭМ3 строятся следующим образом:

- 30% аудиторного времени отводится на знакомство с решением типовой задачи, представленной в соответствующем разделе пособия;
- 70% аудиторного времени – самостоятельное решение задач студентами на базе рассмотренных в типовой задаче алгоритмов с использованием САПР Synopsis TCAD.

Практические занятия в рамках УЭМ4 строятся следующим образом:

- 30% аудиторного времени отводится на знакомство с решением типовой задачи, представленной в соответствующем разделе пособия;
- 70% аудиторного времени – самостоятельное решение задач студентами на базе рассмотренных в типовой задаче алгоритмов с использованием САПР Synopsis TCAD.

Практические занятия в рамках УЭМ5 строятся следующим образом:

- 30% аудиторного времени отводится на знакомство с решением типовой задачи, представленной в соответствующем разделе пособия;
- 70% аудиторного времени – самостоятельное решение задач студентами на базе рассмотренных в типовой задаче алгоритмов с использованием СМ AIM-SPICE и PSPICE.

Таблица А.1 - Организация изучения учебного модуля «Основы проектирования и технологии электронной компонентной базы»

Раздел модуля	Технология и форма проведения занятий	Задания на СРС	Дополнительная литература и интернет-ресурсы
<b>УЭМ1 Основные направления развития современной элементной базы микро- и нанoeлектроники</b>			
1.1 – 1.14	- вводная лекция - опрос - информационная лекция	- изучение литературы по теме - подготовиться к опросу	1 Петров М.Н. Лекции по курсу «Основы проектирования и технологии электронной компонентной базы» / НовГУ им. Ярослава Мудрого. – В. Новгород, 2014. – 165 с.
<b>УЭМ2 САПР, СМ и модели, используемые при проектировании элементной базы микро- и нанoeлектроники</b>			
2.1 – 2.7	- опрос - информационная лекция	- подготовиться к опросу - изучение литературы по теме	1 Казеннов Г.Г. Основы проектирования интегральных схем и систем.- М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2005. – 295 с.
<b>УЭМ3 Моделирование технологических процессов формирования элементов микро- и нанoeлектроники на базе Sentaurus TCAD</b>			
3.1 – 3.2	- информационная лекция - проведение практического занятия	- подготовиться к выполнению практического занятия - изучение литературы по теме	1 Бубенников А.Н. Моделирование интегральных микротехнологий, приборов и схем. – М.: Высшая школа, 1989. – 320 с. 2 Armstrong G.A., Maiti C.K. Technology computer aided design for Si, SiGe, GaAs integrated circuits. The institution of Engineering and Technology, UK, 2007. – 457 p.
3.3 – 3.10	- информационная лекция - опрос - проведение практического занятия	- подготовиться к выполнению практического занятия - подготовиться к опросу - подготовка реферата	1 Петров М.Н. Лекции по курсу «Основы проектирования и технологии электронной компонентной базы» / НовГУ им. Ярослава Мудрого. – В. Новгород, 2014. – 165 с. 2 Sentaurus Process User Guide. Version E-2010.12, Synopsys, December 2010. –1038 p.
<b>УЭМ4 Приборный этап проектирования элементной базы микро- и нанoeлектроники на базе Sentaurus TCAD</b>			
4.1 – 4.2	- информационная лекция - проведение ПЗ	- подготовиться к выполнению ПЗ - изучение литературы по теме	1 Петров М.Н. Лекции по курсу «Основы проектирования и технологии электронной компонентной базы» / НовГУ им. Ярослава Мудрого. – В. Новгород, 2014. – 165 с. 2 Armstrong G.A., Maiti C.K. Technology computer aided design for Si, SiGe, GaAs integrated circuits. The institution of Engineering and Technology, UK, 2007. – 457 p.
4.3 – 4.6	- информационная лекция - опрос - проведение ПЗ	- подготовиться к выполнению ПЗ - подготовиться к опросу - подготовка реферата	1 Technology computer aided design. Simulation for VLSI MOSFET/ Ed. by Chandan Kumar Sarkar. – N-Y.: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2013. – 445 p. 2 Sentaurus Device User Guide. Version E-2010.12, Synopsys, December 2010. – 1284 p.
<b>УЭМ5 Схемотехнический этап проектирования элементной базы микро- и нанoeлектроники на базе СМ AIM-SPICE. Компактные (SPICE) модели компонентов</b>			
5.1 – 5.2	- информационная лекция - проведение ПЗ	- подготовиться к выполнению ПЗ - изучение литературы по теме	1 Pulfrey David L. Understanding Modern Transistors and Diodes. – NY: Cambridge University Press, 2010. – 355 p.
5.3 – 5.5	- информационная лекция - опрос - проведение ПЗ	- подготовиться к выполнению ПЗ - подготовка к опросу	1 Зебрев Г.Н. Физические основы кремниевой нанoeлектроники: Уч. пособие для вузов. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011. – 240 с.

### **А.3 Методические рекомендации по самостоятельной работе студентов**

Самостоятельная работа студентов предполагает изучение теоретического материала по актуальным вопросам учебного модуля. Рекомендуется самостоятельное изучение доступной учебной, научной и оригинальной фирменной литературы (Р1-Р6).

Самостоятельно изученные теоретические материалы оформляются в виде рефератов, которые обсуждаются на практических занятиях.

Студенты имеют возможность глубоко и всесторонне изучить теоретическую часть дисциплины и научиться применять полученные знания на практике.

Темы для работы с источниками

Р1 - создание конспекта по разделу Chapter 3 Ion Implantation источника Sentaurus Process User Guide. Version E-2010.12, Synopsys, December 2010.

Р2 - создание конспекта по разделу Chapter 4 Diffusion источника Sentaurus Process User Guide. Version E-2010.12, Synopsys, December 2010.

Р3 - создание конспекта по разделу Chapter 8 Oxidation and Silicidation источника Sentaurus Process User Guide. Version E-2010.12, Synopsys, December 2010.

Р4 - создание конспекта по разделу Chapter 8 Carrier Transport in Semiconductors источника Sentaurus Device User Guide. Version E-2010.12, Synopsys, December 2010.

Р5 - создание конспекта по разделу Chapter 15 Mobility Models источника Sentaurus Device User Guide. Version E-2010.12, Synopsys, December 2010.

Р6 - создание конспекта по разделу Chapter 6 Doping and Refinement источника Mesh Generation Tools User Guide. Version E-2010.12, Synopsys, December 2010.

Вопросы для самостоятельной подготовки к экзамену УМ «Основы проектирования и технологии электронной компонентной базы».

1. Составьте сопроводительный лист технологического процесса производства КМОП структуры.

2. Использование приборно-технологического моделирования в разработке и производстве устройств электроники.

3. Метод конечных элементов.

4. Математические модели процесса диффузии.

5. Математические модели процесса ионной имплантации.

6. Математические модели процесса окисления.

7. Моделирование процессов нанесения и удаления вещества.

8. Правила создания командного файла для моделирования технологического процесса в Sentaurus Process.

9. Построение эскиза шаблонов в Ligament Layout Editor.

10. Построение технологического процесса с помощью Ligament Flow Editor.

11. Отображение результатов моделирования в программных модулях Svisual и Inspect.

12. Организация математического эксперимента в Sentaurus Workbench.

13. Основные принципы оптимизации технологических процессов микро- и нанoeлектроники.

14. Основные приемы оптимизации конструкции приборов микро- и нанoeлектроники.

15. Численные методы в моделировании технологических процессов.

16. Современное состояние средств приборно-технологического проектирования.

17. Основные способы реализации процессов удаления вещества в нанотехнологии.

18. Применение процессов планарной и изопланарной технологии ИС в нанотехнологии.

19. Составьте сопроводительный лист технологического процесса производства биполярного транзистора.
20. Процессы самоформирования в нанотехнологии.
21. Размерные эффекты и их учет в моделировании процессов и структур нанотехнологии.
22. Квантовые эффекты и их учет в моделировании процессов и структур нанотехнологии.
23. Структура и энергетическая диаграмма равновесного р-п перехода. Токи через переход в состоянии равновесия.
24. Методика определения параметров р-п перехода. Расчет параметров ступенчатого перехода.
25. Энергетическая диаграмма неравновесного р-п перехода. Положения квазиуровней Ферми. Граничные условия для низкого уровня инжекции.
26. Энергетическая диаграмма неравновесного р-п перехода. Положения квазиуровней Ферми. Граничные условия для высокого уровня инжекции.
27. Зависимость ширины р-п перехода от напряжения. Барьерная емкость р-п перехода.
28. Набор уравнений для анализа полупроводниковых приборов. Биполярное уравнение непрерывности — случаи низкого и высокого уровней инжекции.
29. Модель и методика анализа ВАХ идеализированного диода.
30. ВАХ идеализированного диода. Температурный коэффициент напряжения.
31. Ток термогенерации носителей заряда в области р-п перехода и его ВАХ (обратное смещение).
32. Ток рекомбинации носителей заряда в области р-п перехода и его ВАХ (прямое смещение).
33. Диффузионные емкости базы и эмиттера в полупроводниковом диоде. Эквивалентная схема диода.
34. SPICE модель диода
35. Эффект поля в структуре МДП. Режимы обогащения, обеднения, инверсии. Энергетическая диаграмма идеальной МДП структуры в режимах обеднения и инверсии.
36. Структура и принцип действия МДП транзистора. Вид ВАХ.
37. Расчет порогового напряжения МДП транзистора и способы его регулировки.
38. Влияние потенциала подложки на пороговое напряжение МДП транзистора.
39. ВАХ идеализированного МДП транзистора.
40. Особенности ВАХ реального МДП транзистора с длинным каналом (влияние неоднородности ОПЗ под затвором и потенциала подложки).
41. Эффект смыкания в канале МДП транзистора. Расчет напряжения смыкания.
42. Эффект насыщения дрейфовой скорости носителей в канале МДП транзистора; модуляция длины канала (качественно).
43. Эквивалентная схема реального МДП транзистора для большого сигнала.
44. SPICE модель первого уровня (Шихмана-Ходжеса) МДП транзистора.
45. SPICE модели МДП транзистора второго и третьего уровня.
46. Устройство и принцип действия биполярного транзистора. Транзисторный эффект.
47. Режимы работы транзистора. Способы включения (ОБ, ОЭ, ОК) и их особенности.
46. Распределение токов в биполярном транзисторе для нормального активного режима работы. Составляющие базового тока.
47. Модель идеализированного биполярного транзистора Эберса и Молла. Эквивалентная схема.

48. Параметры SPICE модели Эберса-Молла идеализированного биполярного транзистора.

49. Коэффициент усиления базового тока в биполярном транзисторе. Его зависимость от параметров структуры (размеров и степени легирования областей базы, эмиттера).

50. Частотные свойства коэффициента передачи эмиттерного тока в биполярном транзисторе.

51. Диффузионные емкости биполярного транзистора.

52. Эффект Эрли в биполярном транзисторе при включении по схеме ОЭ. Низкочастотная эквивалентная схема. Напряжение Эрли.

53. Зависимости коэффициентов передачи тока  $\alpha_N$  и  $\beta_N$  от тока эмиттера в биполярном транзисторе (качественно). N N

54. Эквивалентная схема Гуммеля-Пуна биполярного транзистора для большого сигнала.

55. Параметры SPICE модели Гуммеля-Пуна идеализированного биполярного транзистора.

Пример экзаменационного билета по УМ «Основы проектирования и технологии электронной компонентной базы»

Министерство образования и науки РФ  
ФГБОУ ВПО «Новгородский государственный университет  
им. Ярослава Мудрого»

---

### ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ №

Учебный модуль «ОПТЭКБ»

кафедра ФТТМ

1. Составьте сопроводительный лист технологического процесса производства КМОП структуры.

2. Размерные эффекты и их учет в моделировании процессов и структур нанотехнологии.

3. Задача.

Выполните моделирование прямой ветви ВАХ диода с  $p-n$ -переходом и отобразите их в полулогарифмическом масштабе, используя следующие параметры SPICE-модели диода:

```
.model diode d is=192.1p n=1 xti=3 eg=1.11 cjo=893.8f  
+ m=98.29m vj=.75 fc=.5 bv=5 ibv=10u nr=2  
+ isr=16.91n ikf=1e-2 rs=0.1
```

Зав. КФТТМ \_\_\_\_\_ Б.И.Селезнев

**Приложение Б**  
(обязательное)

**Технологическая карта**  
**учебного модуля «Основы проектирования и технологии электронной компонентной базы»**  
**семестр – 6, ЗЕ – 9, вид аттестации – экзамен, акад.часов – 324, баллов рейтинга – 450**

Номер и наименование раздела учебного модуля, КП/КР	№ недели сем.	Трудоемкость, ак.час					СРС	Форма текущего контроля успеваемости (в соотв. с паспортом ФОС)	Максим. кол-во баллов рейтинга
		Аудиторные занятия							
		ЛЕК	ПЗ	ЛР	АСРС				
<b>УЭМ1, УЭМ2, УЭМ3 и УЭМ4</b>	<b>1-9</b>	<b>43</b>	<b>29</b>		<b>18</b>	<b>72</b>			
УЭМ1 Основные направления развития современной элементной базы микро- и нанoeлектроники	1-2	14	-		3	16	опросы	48	
УЭМ2 САПР, СМ и модели, используемые при проектировании элементной базы микро- и нанoeлектроники	2-3	7	-		-	16	опросы	24	
УЭМ3 Моделирование технологических процессов формирования элементов микро- и нанoeлектроники на базе Sentaurus TCAD	3-8	12	25		11	32	опросы	36	
							реферат	22	
							работа на ПЗ	45	
УЭМ4 Приборный этап проектирования элементной базы микро- и нанoeлектроники на базе Sentaurus TCAD	8-9	10	4		4	8	опрос	20	
							работа на ПЗ	5	
Рубежная аттестация по учебным элементам (суммарный)	9							<b>200</b>	
<b>УЭМ4, УЭМ5</b>	<b>10-18</b>	<b>11</b>	<b>61</b>		<b>18</b>	<b>72</b>			
УЭМ4	10-12	-	20		7	24	работа на ПЗ	49	
							реферат	22	
УЭМ5 Схемотехнический этап проектирования элементной базы микро- и нанoeлектроники на базе СМ АИМ-SPICE. Компактные (SPICE) модели компонентов	12-18	11	41		11	48	опросы	24	
							работа на ПЗ	105	
Рубежный контроль по учебным элементам (суммарный)	18							<b>200</b>	
Семестровый контроль						36	экзамен	<b>50</b>	
<b>Итого:</b>		<b>54</b>	<b>90</b>		<b>36</b>	<b>144</b>		<b>450</b>	

Критерии оценки качества освоения студентами учебного модуля  
9 ЗЕ = 50 б. × 9 = 450 баллов:

- «удовлетворительно» – от 225 до 314 баллов;
- «хорошо» – от 315 до 404 баллов;
- «отлично» – от 405 до 450 баллов.

**Приложение В**  
(обязательное)

**Паспорта компетенций ОПК-7, ПК-1, ДПК-1, ДПК-2**

- ОПК-7 Способность учитывать современные тенденции развития электроники, измерительной и вычислительной техники, информационных технологий в своей профессиональной деятельности

Уровни	Показатели	Оценочная шкала		
		удовлетворительно	хорошо	отлично
Базовый уровень	Знает основные направления развития современной элементной базы микро- и наноэлектроники	Плохо ориентируется в направлениях развития современной элементной базы микро- и наноэлектроники	Допускает неточности при объяснении основных направлений развития современной элементной базы микро- и наноэлектроники	Четко объясняет основные направления развития современной элементной базы микро- и наноэлектроники
	Умеет учитывать современные тенденции развития электроники	Испытывает трудности при понимании современных тенденций развития электроники	Недостаточно четко оценивает и учитывает современные тенденции развития электроники	Способен грамотно учитывать современные тенденции развития электроники

- ПК-1 способность строить простейшие физические и математические модели приборов, схем, устройств и установок электроники и наноэлектроники различного функционального назначения, а также использовать стандартные программные средства их компьютерного моделирования

Уровни	Показатели	Оценочная шкала		
		удовлетворительно	хорошо	отлично
Базовый уровень	Знает особенности приборно-технологического моделирования микро- и наноэлектронных устройств с помощью САПР Sentaurus TCAD	Испытывает серьезные затруднения при демонстрации знаний	Испытывает небольшие затруднения при демонстрации знаний	Демонстрирует отличные знания
	Умеет правильно определять необходимые модели для проведения приборно-технологического моделирования	Допускает ошибки при определении необходимых моделей для проведения приборно-технологического моделирования	Допускает неточности при определении необходимых моделей для проведения приборно-технологического моделирования	Грамотно определяет необходимые модели для проведения приборно-технологического моделирования
	Владеет пакетом программ приборно-технологического моделирования Sentaurus TCAD	Испытывает трудности при работе с пакетом программ приборно-технологического моделирования Sentaurus TCAD	Самостоятельная работа с пакетом программ приборно-технологического моделирования Sentaurus TCAD вызывает небольшие затруднения	Самостоятельно может работать с пакетом программ приборно-технологического моделирования Sentaurus TCAD

- ДПК-1 способность к разработке и моделированию конструкций и топологий изделий «система в корпусе»

Уровни	Показатели	Оценочная шкала		
		удовлетворительно	хорошо	отлично
Базовый уровень	Знает физические процессы в интегральных микро- и нанoeлектронных устройствах - биполярных и МДП приборах	Испытывает трудности при объяснении физических процессов в интегральных микро- и нанoeлектронных устройствах	Допускает неточности при объяснении физических процессов в интегральных микро- и нанoeлектронных устройствах	Четко объясняет суть физических процессов в интегральных микро- и нанoeлектронных устройствах
	Знает принципы, используемые в системах автоматизированного схемотехнического проектирования	Испытывает трудности при демонстрации знаний принципов, используемых в системах автоматизированного схемотехнического проектирования	Допускает неточности при объяснении принципов, используемых в системах автоматизированного схемотехнического проектирования	Имеет четкое представление о принципах, используемых в системах автоматизированного схемотехнического проектирования
	Умеет применять приобретенные знания для проведения коррекции моделей микро- и нанoeлектронных устройств для компьютерного моделирования с учетом изменения параметров масштабированных структур	Испытывает трудности при применении приобретенных знаний для проведения коррекции моделей микро- и нанoeлектронных устройств для компьютерного моделирования	Допускает неточности при применении приобретенных знаний для проведения коррекции моделей	Умеет правильно применять свои знания на практике
	Владеет методами схемотехнического проектирования на базе CM SPICE с использованием компактных моделей микро- и нанoeлектронных компонентов	Плохо владеет методами схемотехнического проектирования	Недостаточно уверенно владеет методами схемотехнического проектирования	Методами схемотехнического проектирования владеет на достаточно хорошем уровне

- ДПК-2 способность к организации и контролю технологического процесса выпуска изделий микроэлектроники

Уровни	Показатели	Оценочная шкала		
		удовлетворительно	хорошо	отлично
Базовый уровень	Знает основные законы построения технологических процессов, основные математические модели технологических процессов	Испытывает серьезные затруднения при объяснении основных законов построения тех. процессов и основных математических моделей технологических процессов	Допускает неточности при демонстрации знаний о законах построения тех. процессов	Имеет четкое представление об основных законах построения тех. процессов и основных математических моделях тех. процессов
	Умеет разрабатывать технологические маршруты изготовления электронных и наноэлектронных приборов	Испытывает трудности при разработке технологических маршрутов изготовления электронных и наноэлектронных приборов	Допускает не критические ошибки при разработке технологических маршрутов	Способен грамотно разрабатывать технологические маршруты изготовления электронных и наноэлектронных приборов
	Владеет методами математического моделирования технологических процессов с целью их оптимизации	Слабо владеет методами математического моделирования технологических процессов	Испытывает небольшие затруднения при проведении математического моделирования технологических процессов с целью их оптимизации	Способен правильно применять методы математического моделирования технологических процессов с целью их оптимизации

**Приложение Г**  
(обязательное)

**Карта учебно-методического обеспечения**

Учебного модуля «**Основы проектирования и технологии электронной компонентной базы**»

Направление (специальность) 11.03.04 - Электроника и нанoeлектроника

Формы обучения очная

Курс 3 Семестр 6

Часов: всего 324, лекций 54, практ. зан. 90, СРС 180 (в т.ч. 36 ч. – экзамен)

Обеспечивающая кафедра ФТТМ

Таблица Г.1- Обеспечение учебного модуля учебными изданиями

Библиографическое описание издания (автор, наименование, вид, место и год издания, кол. стр.)	Кол. экз. в библ. НовГУ	Наличие в ЭБС
<b>Учебники и учебные пособия</b>		
1. Королев, М. А. Технология, конструкции и методы моделирования кремниевых интегральных микросхем: учеб. пособие для вузов. Ч. 1: Технологические процессы изготовления кремниевых интегральных схем и их моделирование / М. А. Королев, Т. Ю. Крупкина, М. А. Ревелева; под общ. ред. Ю.А.Чаплыгина. - М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. - 396, [1] с.	2	
Королев, М.А. Технология, конструкции и методы моделирования кремниевых интегральных микросхем: учеб. пособие для вузов: в 2 ч. Ч. 1: Технологические процессы изготовления кремниевых интегральных схем и их моделирование / М. А. Королев, Т. Ю. Крупкина, М. А. Ревелева; под общ. ред. Ю.А.Чаплыгина. - М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. - 396, [2] с.	10	
Королев, М. А. Технология, конструкции и методы моделирования кремниевых интегральных микросхем : учеб. пособие для вузов: в 2 ч. Ч. 1: Технологические процессы изготовления кремниевых интегральных схем и их моделирование / М. А. Королев, Т. Ю. Крупкина, М. А. Ревелева; под общ. ред. Ю. А. Чаплыгина. - 2-е изд. (электрон.). - М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012.		БиблиоТех - <a href="https://novsu.bibliotech.ru/Reader/BookPreview/1229849">https://novsu.bibliotech.ru/Reader/BookPreview/1229849</a> (доступно 25 страниц)
2. Красников, Г.Я. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов: в 2 ч. Ч. 1 / Г.Я.Красников. - М.: Техносфера, 2002. - 413 с.	2	
Красников, Г.Я. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов: в 2 ч. Ч. 2 / Г. Красников. - М.: Техносфера, 2004. - 535 с.	2	
Красников, Г.Я. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов / Г.Я.Красников. - 2-е изд., испр. - М.: Техносфера, 2011. - 799, [1] с.	4	

Библиографическое описание издания (автор, наименование, вид, место и год издания, кол. стр.)	Кол. экз. в библ. НовГУ	Наличие в ЭБС
3. Петров, М. Н. Моделирование компонентов и элементов интегральных схем: учеб. пособие для вузов / М. Н. Петров, Г.В.Гудков. – СПб.; М.; Краснодар: Лань, 2011. – 462 с.	15	
Петров, М. Н. Моделирование компонентов и элементов интегральных схем : учеб. пособие для вузов / М. Н. Петров, Г. В. Гудков. - СПб. : Лань, 2017. - 462, [1] с.	1	
4. Технология, конструкции и методы моделирования кремниевых интегральных микросхем : учеб. пособие для вузов : в 2 ч. Ч. 2 : Элементы и маршруты изготовления кремниевых ИС и методы их математического моделирования / М. А. Королев [и др.] ; под общ. ред. Ю. А. Чаплыгина. - М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. - 422, [1] с.	10	
Технология, конструкции и методы моделирования кремниевых интегральных микросхем : учеб. пособие для вузов : в 2 ч. Ч. 2 : Элементы и маршруты изготовления кремниевых ИС и методы их математического моделирования / М. А. Королев [и др.] ; под общ. ред. Ю. А. Чаплыгина. - 2-е изд. (электрон.). - М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012.		БиблиоТех - <a href="https://novsu.bibliotech.ru/Reader/BookPreview/1229878">https://novsu.bibliotech.ru/Reader/BookPreview/1229878</a> (доступно 25 страниц)
<b>Учебно-методические издания</b>		
1. Петров, М. Н. Лекции по курсу «Основы проектирования и технологии электронной компонентной базы» / М. Н. Петров; НовГУ. - Великий Новгород, 2014. - 165 с.	нет	
2. Петров, М.Н. Методические указания к практическим занятиям по курсу «Основы проектирования и технологии электронной компонентной базы» [Электронный ресурс] / М. Н. Петров; НовГУ. - Великий Новгород, 2014. – 65 с.	нет	
3. Петров, М. Н. Моделирование микроэлектронных компонентов и схем с помощью программы АІМ-SPICE : учеб. пособие / М. Н. Петров ; Новгород. гос. ун-т им. Ярослава Мудрого. - Великий Новгород, 2014. - 72, [1] с.	10	
4. Петров, М. Н. Моделирование микроэлектронных компонентов и схем с помощью программы АІМ-SPICE : учеб. пособие / М. Н. Петров ; Новгород. гос. ун-т им. Ярослава Мудрого. - Великий Новгород, 2015. - 72, [1] с.		БиблиоТех - <a href="https://novsu.bibliotech.ru/Reader/Book/-2185">https://novsu.bibliotech.ru/Reader/Book/-2185</a>
5. Рабочая программа модуля с приложениями «Основы проектирования и технологии электронной компонентной базы» / авт.-сост. М. Н. Петров; НовГУ. – Великий Новгород, 2017. – 25 с.	нет	

Таблица Г.2 – Информационное обеспечение учебного модуля

Название программного продукта, интернет-ресурса	Электронный адрес	Примечание
1 Сайт компании Synopsys	<a href="http://www.synopsis.com">http://www.synopsis.com</a>	
2 Федеральный интернет-портал «Нанотехнологии и наноматериалы»	<a href="http://www.portalnano.ru">http://www.portalnano.ru</a>	
3 Образовательный математический сайт	<a href="http://www.exponenta.ru">http://www.exponenta.ru</a>	
4 Сайт компании AIM-SPICE	<a href="http://www.aimspice.com/">http://www.aimspice.com/</a>	
5 Сайт компании Cadence	<a href="http://www.cadencepcb.com">http://www.cadencepcb.com</a>	
6 Сайт Digital Daily Digest	<a href="http://www.3dnews.ru">http://www.3dnews.ru</a>	

Таблица Г.3 – Дополнительная литература

Библиографическое описание издания (автор, наименование, вид, место и год издания, кол. стр.)	Кол. экз. в библ. НовГУ	Наличие в ЭБС
1. Зебрев, Г. И. Физические основы кремниевой наноэлектроники : учеб. пособие для вузов / Г. И. Зебрев. - М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011. - 240 с.	10	БиблиоТех - <a href="https://novsu.bibliotech.ru/Reader/BookPreview/1227759">https://novsu.bibliotech.ru/Reader/BookPreview/1227759</a> (доступно 25 страниц)
2. Казеннов, Г. Г. Основы проектирования интегральных схем и систем / Г. Г. Казеннов. - М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2005. - 295 с.	6	

Действительно для учебного года \_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_

Зав. кафедрой \_\_\_\_\_ Б.И. Селезнев

\_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ г.

СОГЛАСОВАНО  
НБ НовГУ:

\_\_\_\_\_

должность

\_\_\_\_\_

подпись

\_\_\_\_\_

расшифровка