

УТВЕРЖДАЮ  
Директор ИЭИС  
  
С.И.Эминов  
И.О.Фамилия  
18 мая 2018 г.  
число      месяц

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ СОВРЕМЕННЫХ ПРИБОРОВ МИКРО - И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

Дисциплина (модуль) по направлению подготовки  
11.06.01 Электроника, радиотехника и системы связи  
Направленность: Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и  
наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах

Рабочая программа

СОГЛАСОВАНО

Начальник УМУ

  
Г.Н.Чурсинова  
И.О.Фамилия  
16 05 2018 г.  
число      месяц

Начальник УАО

  
Н.Н.Максимюк  
И.О.Фамилия  
16 мая 2018 г.  
число      месяц

Разработал: к.т.н., проф.

  
М.Н.Петров  
И.О.Фамилия  
16 мая 2018 г.  
число      месяц

Принято на заседании кафедры ФТТМ  
Протокол № 8 от 16 мая 2018 г.

Заведующий кафедрой ФТТМ

  
Б.И.Селезнев  
И.О.Фамилия  
16 мая 2018 г.  
число      месяц

## 1 Цели и задачи дисциплины (модуля)

Целью дисциплины (модуля) «Проектирование и технология современных приборов микро- и нанoeлектроники» является формирование компетентности студентов в области проектирования и технологии нанoeлектронных СБИС и СНК на кремнии.

Основными задачами модуля являются:

– сформировать у слушателей образовательной программы знания перспективных технологических процессов, используемых для разработки и производства нанoeлектронных СБИС и КНС в КМОП базисе;

– формирование системы знаний, касающихся принципов действия, алгоритмов и программной реализации базовых САПР, используемых на различных иерархических этапах проектирования СБИС и КНС;

– выработка умения применять базовые САПР и СМ для проектирования соответствующих функциональных модулей, формирующих архитектуру современных СБИС и КНС.

## 2 Место дисциплины (модуля) ОП направления подготовки

Дисциплина (модуль) **БК.ВВ.2.1** «Проектирование и технология современных приборов микро- и нанoeлектроники» направлен на изучение модуля «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах» и подготовку к сдаче кандидатского экзамена, входит в модули по выбору блока **БП.В**. Изложение курса базируется на результатах изучения Программы вступительных испытаний при поступлении в аспирантуру по направлению 11.06.01 «Электроника, радиотехника и системы связи».

В результате изучения Программы вступительных испытаний при поступлении в аспирантуру по направлению 11.06.01 «Электроника, радиотехника и системы связи» и для изучения учебного модуля «Проектирование и технология современных приборов микро- и нанoeлектроники» обучающиеся должны:

знать:

– технологию создания твердотельных микро- и наноструктур;

– физические процессы, лежащие в основе функционирования базовых полупроводниковых структур;

– физические и математические модели приборов и устройств электроники и нанoeлектроники.

уметь:

– применять физические и математические модели для расчета характеристик микроструктур;

– выявлять доминирующие физико-химические факторы в технологическом цикле создания микроприборов;

владеть:

– современным математическим аппаратом, используемым для построения моделей приборов и устройств электроники и навыками расчета основных параметров и характеристик приборов твердотельной электроники.

Освоение данного модуля необходимо при изучении следующих учебных модулей:

- блок 2 «Практика»;
- блок 3 «Научно-исследовательская работа».

### 3 Требования к результатам освоения дисциплины

Процесс изучения дисциплины направлен на освоение компетенций:

- УК-6 (универсальная компетенция) – способность планировать и решать задачи собственного профессионального и личностного развития;
- ОПК-1 (общепрофессиональная компетенция) – владение методологией теоретических и экспериментальных исследований в области профессиональной деятельности;
- ПК-1 (профессиональная компетенция) – способность учитывать современные тенденции развития электроники в своей профессиональной деятельности;
- ПК-2 (профессиональная компетенция) – способность планировать и организовывать экспериментальные исследования, научные семинары в области электроники, уметь составлять и оформлять научно-техническую документацию, научные отчеты, доклады и статьи;
- ПК-3 (профессиональная компетенция) – способность адаптировать и обобщать результаты исследований в области электроники для целей преподавания специальных дисциплин в вузе;
- ПК-4 (профессиональная компетенция) – способностью использовать результаты исследований, знание закономерностей и тенденций развития электроники для совершенствования стратегии деятельности предприятий, НИИ и КБ радиоэлектронного комплекса.

В результате освоения дисциплины (модуля) аспирант должен знать, уметь и владеть:

Шифр Индикатора достижения результата обучения (ИДРО)	Планируемые индикаторы достижения результата обучения (освоения компетенции)	Показатели достижения заданного уровня освоения компетенции			
		Не достигнут (0-49%)  Оценка: «Не удовлетворительно»	Достигнут на среднем уровне (50-59%)  Оценка: «Удовлетворительно»	Достигнут на уровне выше среднего (60-89%)  Оценка: «Хорошо»	Достигнут полностью (90-100%)  Оценка: «Отлично»
УК-6 (31)	<b>Знать:</b> - возможные сферы и направления профессиональной самореализации; приемы и технологии целеполагания и целереализации; пути достижения более высоких уровней профессионального и личного развития.	Не знает	Знает основные понятия	Знает на достаточном уровне	Знает на высоком уровне
УК-6 (У1)	<b>Уметь:</b> - ставить цели, задачи и применять технологии само-	Не умеет	В основном умеет	Умеет в достаточной мере	Умеет в полной мере

	определения, самостоятельно формулировать предметно-научные и методологические проблемы, выдвигать гипотезы для их решения и анализировать их				
УК-6 (В1)	<b>Владеть:</b> - навыками управления и организации самостоятельной деятельности по самосовершенствованию и профессиональному развитию	Не владеет	Владеет основными навыками	Владеет навыками в достаточной мере	Владеет навыками в полной мере
ОПК-1 (З1)	<b>Знать:</b> - методологию теоретических и экспериментальных исследований в области электроники	Не знает	Знает основные понятия	Знает на достаточном уровне	Знает на высоком уровне
ОПК-1 (У1)	<b>Уметь:</b> - осуществлять выбор адекватных и эффективных методов теоретического и экспериментального исследования в области электроники	Не умеет	В основном умеет	Умеет в достаточной мере	Умеет в полной мере
ОПК-1 (В1)	<b>Владеть:</b> - навыками в использовании методов и средств теоретических и экспериментальных исследований в области электроники	Не владеет	Владеет основными навыками	Владеет навыками в достаточной мере	Владеет навыками в полной мере
ПК-1 (З2)	<b>Знать:</b> - проблемы и задачи, связанные с разработкой научных основ, физических и технических принципов создания и совершенствования приборов твердотельной электроники, микро- и нанoeлектроники, радиоэлектронных компонентов, приборов на квантовых эффектах	Не знает	Знает основные понятия	Знает на достаточном уровне	Знает на высоком уровне
ПК-1 (У4)	<b>Уметь:</b> - выбирать для достижения целей исследования современные методы технологии, измерений и моделирования	Не умеет	В основном умеет	Умеет в достаточной мере	Умеет в полной мере
ПК-1 (В4)	<b>Владеть:</b> - способностью к применению перспективных электронных и информационных технологий при разработке электронной компонентной базы	Не владеет	Владеет основными навыками	Владеет навыками в достаточной мере	Владеет навыками в полной мере
ПК-2 (З2)	<b>Знать:</b> - специфическую терминологию по направлению исследований, в том числе на иностранном языке, используемую при составлении и оформлении научно-технической документации, научных отчетов, докладов и статей	Не знает	Знает основные понятия	Знает на достаточном уровне	Знает на высоком уровне

ПК-2 (У2)	<p><b>Уметь:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- выявлять проблемные места в области современной электронной компонентной базы, формулировать проблемы для исследования; ставить цель и конкретизировать ее на уровне задач;</li> <li>- проводить с использованием современных технологий и методов теоретические и экспериментальные исследования новых процессов и явлений в электронике, позволяющих повысить характеристики электронной компонентной базы;</li> <li>- обоснованно выбирать измерительное и диагностическое оборудование при организации экспериментальных исследований.</li> </ul>	Не умеет	В основном умеет	Умеет в достаточной мере	Умеет в полной мере
ПК-2 (У3)					
ПК-2 (У4)					
ПК-2 (В2)	<p><b>Владеть:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- передовыми программными продуктами и новейшими аппаратными средствами проведения теоретических и экспериментальных исследований в области твердотельной электроники, микро- и нанoeлектроники, радиоэлектронных компонентов, приборов на квантовых эффектах.</li> </ul>	Не владеет	Владеет основными навыками	Владеет навыками в достаточной мере	Владеет навыками в полной мере
ПК-3 (З3)	<p><b>Знать:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- математические методы обработки результатов исследований</li> </ul>	Не знает	Знает основные понятия	Знает на достаточном уровне	Знает на высоком уровне
ПК-3 (У2)	<p><b>Уметь:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- разработать комплексное учебно- и научно-методическое обеспечение (методы, технологии, дидактические ресурсы, отчеты, презентации, конспекты лекций, методические указания и т.д.) по теме исследований, в том числе и для реализации образовательных программ высшего образования по направлению «Электроника и нанoeлектроника»;</li> <li>- обоснованно выбирать измерительное и диагностическое оборудование при организации экспериментальных исследований.</li> </ul>	Не умеет	В основном умеет	Умеет в достаточной мере	Умеет в полной мере
ПК-3 (У3)					
ПК-3 (В2)	<p><b>Владеть:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- передовыми программными продуктами и новейшими аппаратными средствами проведения теоретических и экспериментальных исследований в области твердотельной электроники, микро- и</li> </ul>	Не владеет	Владеет основными навыками	Владеет навыками в достаточной мере	Владеет навыками в полной мере

	нанoeлектроники, радиоэлектронных компонентов, приборов на квантовых эффектах.				
ПК-4 (32)	<b>Знать:</b> - актуальные научные, технические и производственные проблемы в области твердотельной электроники, микро- и нанoeлектроники, радиоэлектронных компонентов, приборов на квантовых эффектах;	Не знает	Знает основные понятия	Знает на достаточном уровне	Знает на высоком уровне
ПК-4 (33)	- методы проектирования и технологию изготовления современной электронной компонентной базы;				
ПК-4 (34)	- современные методы и средства моделирования приборов твердотельной электроники, микро- и нанoeлектроники, радиоэлектронных компонентов, приборов на квантовых эффектах;				
ПК-4 (35)	- аналитическое и диагностическое оборудование, используемое в научных лабораториях и в условиях реального производства				
ПК-4 (36)	- измерительное оборудование, используемое в научных лабораториях и в условиях реального производства.				
ПК-4 (У1)	<b>Уметь:</b> - определить оптимальную методологию научных исследований и направление проектных работ, направленных на совершенствование существующих перечисленных приборов, компонентов, изделий, повышение их функциональных и эксплуатационных характеристик, а также эффективности применения;	Не умеет	В основном умеет	Умеет в достаточной мере	Умеет в полной мере
ПК-4 (У2)	- исследовать и моделировать функциональные и эксплуатационные характеристики изделий, включая вопросы качества, долговечности, надежности и стойкости к внешним воздействующим факторам, а также вопросы эффективного применения;				
ПК-4 (У3)	- формировать физические и математические модели приборов, компонентов, изделий электроники, в том числе для систем				

ПК-4 (У4)	<p>автоматизированного проектирования;</p> <p>- по результатам исследований физических и технических принципов создания приборов, компонентов, изделий предлагать физические принципы создания новых и совершенствования традиционных приборов твердотельной электроники, радиоэлектронных компонентов, изделий микро- и нанoeлектроники, приборов на квантовых эффектах, включая оптоэлектронные приборы и преобразователи физических величин (сенсоры);).</p>				
ПК-4 (В2)	<p><b>Владеть:</b></p> <p>- современными компьютерными программами по моделированию и проектированию приборов, компонентов, изделий электроники;</p>	Не владеет	Владеет основными навыками	Владеет навыками в достаточной мере	Владеет навыками в полной мере
ПК-4 (В3)	<p>- навыками создания физических и математических моделей приборов, компонентов, изделий электроники;</p>				
ПК-4 (В4)	<p>- методами исследования технологических основ создания и совершенствования приборов, компонентов, изделий электроники;</p>				
ПК-4 (В5)	<p>- методами диагностики приборов, компонентов, изделий электроники.</p>				

## 4 Структура и содержание дисциплины (модуля)

### 4.1 Трудоемкость дисциплины

В структуре УМ выделены учебные элементы дисциплины в качестве самостоятельных разделов.

#### Очная форма обучения

Учебная работа (УР)	Всего	Распределение по семестрам
		5 СЕМЕСТР
<b>Трудоемкость «дисциплины» в зачетных единицах (ЗЕТ)</b>	3	3
<b>Распределение трудоемкости по видам УР в академических часах (АЧ):</b>	108	108
<b>1) УЭМ1 Основные технологические инновации, внедренные в производство микро- и нанoeлектронных приборов за последние 15 лет</b>	54	54
- лекции	5	5
- практические занятия (семинары)	3	3
- лабораторные работы		
- аудиторная СРС		
- внеаудиторная СРС	46	46
<b>2) УЭМ2 САПР, СМ и модели, используемые при проектировании элементной базы микро- и нанoeлектроники</b>	54	54
- лекции	5	5
- практические занятия (семинары)	3	3
- лабораторные работы		
- аудиторная СРС		
- внеаудиторная СРС	46	46
<b>Аттестация:</b>	Зачет	Зачет
- зачеты*		
- экзамены		

\*) - зачеты принимаются в часы контактной (аудиторной) работы.

**Трудоемкость дисциплины «Проектирование и технология современных приборов микро- и нанoeлектроники» (заочная форма обучения)**

Учебная работа (УР)	Всего	Распределение по семестрам
		6 СЕМЕСТР
<b>Трудоемкость «дисциплины» в зачетных единицах (ЗЕТ)</b>	3	3
<b>Распределение трудоемкости по видам УР в академических часах (АЧ):</b>	108	108
1) <i>УЭМ1 Основные технологические инновации, внедренные в производство микро- и нанoeлектронных приборов за последние 15 лет</i>	54	54
- лекции	3	3
- практические занятия (семинары)	2	2
- лабораторные работы		
- аудиторная СРС		
- внеаудиторная СРС	49	49
2) <i>УЭМ2 САПР, СМ и модели, используемые при проектировании элементной базы микро- и нанoeлектроники</i>	54	54
- лекции	3	3
- практические занятия (семинары)	2	2
- лабораторные работы		
- аудиторная СРС		
- внеаудиторная СРС	49	49
<b>Аттестация:</b>	Зачет	Зачет
- зачеты*		
- экзамены		

\*) - зачеты принимаются в часы контактной (аудиторной) работы.

## **4.2 Содержание и структура разделов дисциплины**

*УЭМ1 Основные технологические инновации, внедренные в производство микро- и нанoeлектронных приборов за последние 15 лет*

### **1.1 Эволюция развития интегральной технологии.**

Изобретение ИС и последующее эволюционное развитие их производства. Три 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, к интеграции знаний.

Закон Мура – главная движущая сила микроэлектроники. Следствие работы закона Мура. Совмещение процессоров и схем памяти на базе развития КМОП технологии. Появление систем на кристалле (SOC), совмещающих на одном чипе функции различных

функциональных модулей: аналоговых, цифровых, силовых, сенсоров изображений (и других сенсоров), солнечных батарей, телевизионных блоков.

Средства интеграции, используемых на разных уровнях проектирования ИС. Технологическая, элементной базы, схемотехническая, системотехническая, интеграция знаний (конвергенция наук и технологий).

Технология масштабирования. Физический смысл масштабного фактора. Эволюционное изменение величины топологической нормы. Преимущество технологии масштабирования: снижение размеров, повышение быстродействия, уменьшение потребляемой мощности, снижение стоимости. Масштабирование напряжения источника питания. Прогнозируемый предел топологической нормы.

Цена технологических инноваций. Относительная стоимость технологии. Стоимость фабрики. Стоимость проектирования. Динамика роста издержек на производство и проектирование. Причины роста стоимости технологии: технологические усовершенствования; расширение спектра применяемых материалов; непрерывный рост количества слоев металлизации; усложнение процесса проектирования топологии.

## 1.2 Основные прорывные технологии при создании КМОП ИС за последние 15 лет.

Технологические проблемы реализации шин металлизации на базе меди. Графен - как возможная альтернатива будущей замене медных проводников. Внедрение технологии изготовления структур кремний на диэлектрике (SOI). Проблемы и конкурентные преимущества данной технологии.

Разработка и внедрение технологии напряженного (strain) кремния. Достоинства и особенности ее реализации для МОП транзисторов с каналами n- и p-типов.

Разработка защитного диэлектрика с низким значением  $\epsilon$  (Low-K). Технологии создания Low- $k$  диэлектриков.

Разработка подзатворного диэлектрика с высокой диэлектрической проницаемостью (High-K). Причины перехода к такому типу подзатворных диэлектриков. Плюсы: снижение токов утечки и повышение рабочих токов МОП транзистора. Типы, используемых High-K диэлектриков. Технологии их изготовления.

Использование в КМОП технологии сплавов SiGe. Возможность реализации с помощью них эффективных биполярных транзисторов, используемых для формирования аналоговых и RF блоков.

Применение на литографии двух и четырех шаблонов. Переход к EUV литографии (13 нм вместо 192 нм). Проблемы реализации EUV литографии.

Переход от двухмерных МОП транзисторов (MOSFET) к трехмерным (FinFET), содержащим несколько каналов. Достоинство - возможность создавать в одном процессе приборы для разных применений: цифровые схемы, память, аналоговые, RF, что позволяет использовать их для реализации систем на кристалле (SOC). Другие преимущества FinFET транзисторов. Проблемы моделирования FinFET транзисторов.

Сокращение числа компаний, имеющих собственную технологическую базу. Появление кремниевых мастерских (Fabless companies), выполняющих функции полупроводниковых заводов. Основные современные фабрики по производству полупроводниковых чипов.

На пути к 7-5-4 нм технологии. Samsung - переход на EUV литографию (13 нм ) при реализации фирмой технология 7nm Low Power Plus (7LPP). Переход к новой элементной базе - Multi Bridge Channel FET (MBFET) при разработке 4 нм технология 4LPP фирмами IBM и Samsung.

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

## 2.1 Суть имитационного моделирования.

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

Задачи, решаемые с помощью имитационного моделирования. Модели. Свойства моделей.

Системный подход к проектированию Понятие системы, модели, системы моделирования.

## 2.2 Иерархия СБИС. Системы автоматизированного проектирования СБИС и СНК.

Автоматизация проектирования заказных БИС. Проблемы создания сквозной САПР.

Кремниевые компиляторы - это САПР, позволяющие разрабатывать топологию ИС на основе системного описаний высокого уровня абстракции. Алгоритм генерации топологи ИС кремниевым компилятором. Недостатки кремниевых компиляторов: неэффективность использования площади кристалла за счет использования избыточного количества транзисторов и низкая универсальность.

Уровни проектирования: кремниевый (физический), компонентный (транзисторный), схемотехнический, функционально-логический (вентильный), регистровый, микропроцессорный (микросхемный), системный.

Интегрированные САПР на базе программных средств, используемых на различных уровнях проектирования ИС. Основные производители: SYNOPSYS, CADENCE, MENTOR GRAPHICS.

Кремниевый (физический) уровень проектирования. Программные средства для разработки топологии, моделирования технологических процессов, расчета параметров физических моделей компонентов ИС.

Моделирование всех этапов стандартного технологического процесса: диффузии, имплантации (включая метод Монте-Карло), окисления, травления, осаждения и силицидизации в одно- двух- и трехмерном измерении для кремния и сложных полупроводников в среде САПР Sentaurus Process и Sentaurus Structure Editor.

Проектирование топологии специализированных (заказных) интегральных схем в базе КМОП с помощью САПР MicroWind. Процедуры автоматизированной проверки выполнения правил проектирования и трехмерной визуализации последовательности технологических операций при формировании фрагментов интегральных схем. Примеры выполнения проектов фрагментов топологии интегральной схемы с последующей проверкой правильности функционирования в САПР DSCH.

Компонентный (транзисторный) уровень проектирования.

Расчет параметров физических моделей компонентов. Модуль Sentaurus Device – САПР, предназначенный для двух- и трехмерного моделирования 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. Синтез приборно-технологических моделей. Возможность реализации смешанного моделирования с использованием физических и компактных (SPICE) моделей компонентов ИС.

Схемотехнический этап проектирования на базе SPICE-подобных систем моделирования (PSPICE, AIM-SPICE, LTSPICE).

Задачи схемотехнического моделирования. Отличие компактных моделей от приборно-технологических моделей (физических). Варианты синтеза компактных моделей. Типы компактных (SPICE) моделей. Четыре поколения компактных моделей.

Функционально-логический (вентильный) этап проектирования ИС.

Цель логического моделирования. Высокоуровневые языки описания цифровых систем: VHDL и Verilog. САПР Quartus II фирмы Altera.

Программные средства, используемые на системном этапе проектирования.

Проблемы проектирования сложных систем.

Средства визуального проектирования на примере программного продукта Simulink, входящего в состав системы компьютерной математики MATLAB. Достоинства – наличие обширной, открытой для изучения и модификации библиотеки разнообразных функциональных блоков: цифровых, аналоговых, радиочастотных, датчиков. Возможность синтеза уникальных блоков путем написания подпрограмм на языке MATLAB, а также C<sup>++</sup>, Fortran и Ada. Возможность интеграции системного этапа проектирования с логическим и схемотехническим этапами за счет поддержки языка цифрового моделирования VHDL и моделей блоков ИС, написанных на языке программы SPICE.

Синтез систем на базе IP-блоков. Особенность проектировании систем на кристалле (SoC) - слияние не только различных функциональных блоков, но и разных способов проектирования. Разновидности блоков индивидуальной собственности. Фирмы-разработчики IP-модулей: Acorn RISC Machine (ARM), Falanx (графические процессоры Mali).

Календарный план, наименование разделов дисциплины с указанием трудоемкости по видам учебной работы представлены в технологической карте дисциплины (приложение Б).

#### **4.3 Организация изучения дисциплины**

Методические рекомендации по организации изучения дисциплины «Проектирование и технология современных приборов микро- и нанoeлектроники» и достижении планируемых результатов обучения для достижения заданного уровня освоения компетенций с учетом использования в учебном процессе активных и интерактивных форм проведения учебных занятий и электронной информационно-образовательной среды даются в Приложении А.

## **5 Контроль и оценка качества освоения дисциплины (модуля)**

Контроль качества освоения аспирантами дисциплины «Проектирование и технология современных приборов микро- и нанoeлектроники» и его составляющих осуществляется непрерывно в течение всего периода обучения с использованием бально-рейтинговой системы (БРС), являющейся обязательной к использованию всеми структурными подразделениями университета.

Для оценки качества освоения дисциплины используются формы контроля: текущий – регулярно в течение всего семестра, промежуточная аттестация (семестровый контроль). Оценка качества освоения дисциплины осуществляется с использованием фонда оценочных средств, разработанного для данной дисциплины, по всем формам контроля.

Содержание видов контроля и их график отражены в технологической карте дисциплины «Проектирование и технология современных приборов микро- и нанoeлектроники» (Приложение Б).

## **6 Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины представлено Картой учебно-методического обеспечения (Приложение В)**

## **7 Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)**

### ***Лаборатория проектирования полупроводниковых приборов и интегральных схем - 1321:***

- Учебная версия САПР Microwind для проектирования топологии КМОП интегральных схем;
- Учебные версии систем схемотехнического моделирования AIM-SPICE (AIM-Software) и PSPICE (Cadence Design Systems);
- Полнофункциональная бесплатная система схемотехнического моделирования LTSPICE (Linear Technology);
- Лицензионный приборно-технологическая САПР Synopsys TCAD Sentaurus, включающая набор функциональных модулей для моделирования и эмуляции технологического процесса (Sentaurus Process, TSUPREM-4 и Sentaurus Structure Editor), приборного моделирования (Sentaurus Device), визуализации результатов расчета (Sentaurus Inspect) и графическую оболочку (Sentaurus Workbench).
- Система визуального моделирования Simulink, входящая в пакет вычислительной математики MATLAB 9.
- САПР Quartus II фирмы Altera для синтеза и моделирования цифровых устройств.

### ***Мультимедийная учебная лаборатория – 1313***

Содержит:

- мультимедийная система ПК IBM ATX Inwia S500;
  - монитор 17/КК/м;
  - мультимедийный проектор Epson EMP-X5;

- подвесной экран;
  - лицензия Windows 7 Professional),
- объединенные в локальную сеть с выходом в Интернет.

***Презентации:***

- Тема 1. Обзор инновационных технологий, внедренных в производство изделий микроэлектроники за последние 15 лет;
- Тема 2. САПР, СМ и модели, используемые при проектировании микроэлектронных приборов и интегральных схем: части 1 и 2;
- Тема 3. Системы на кристалле (СНК, SOC): функциональные модули и особенности проектирования.

**Приложения (обязательные):**

А – Методические рекомендации по организации изучения дисциплины

Б – Технологическая карта

В - Карта учебно-методического обеспечения дисциплины

## **Приложение А** (обязательное)

### **Методические рекомендации по организации изучения дисциплины «Проектирование и технология современных приборов микро- и нанoeлектроники»**

Целью занятий по дисциплине (модулю) «Проектирование и технология современных приборов микро- и нанoeлектроники» является формирование компетентности студентов в области проектирования и технологии СБИС и СНК на нано метровом уровне.

Задачами занятий являются:

- ознакомление с современными методами проектирования СБИС и СНК на базе КМОП технологии нано метрового диапазона;
- изучение особенностей приборно-технологического моделирования нано электронных устройств на базе кремния;
- изучение технологических особенностей изготовления нанометровых СБИС и СНК;
- получение практических навыков работы с современными САПР микроэлектроники.

Структура и содержание основных разделов представлены в приложении А1. Лекционная работа проводится с использованием мультимедийной аудитории с демонстрацией презентаций, представленных в разделе 7. Заслушиваются доклады по тематике рефератов.

*Примерные темы рефератов:*

- Проблемы реализации EUV литографии.
- Основные современные фабрики по производству полупроводниковых чипов.
- Проблемы моделирования FinFET транзисторов.
- Проблемы создания сквозной САПР.
- Кремниевые компиляторы.
- Кремниевый (физический) уровень проектирования.
- САПР MicroWind для проектирование топологии специализированных (заказных) интегральных схем в базисе КМОП.
- Компонентный (транзисторный) уровень проектирования.
- САПР Quartus II фирмы Altera.
- Средства визуального проектирования на примере программного продукта Simulink.
- Особенность проектировании систем на кристалле (SoC).
- Основные фирмы-разработчики IP-модулей.
- Возможность реализации концепции смешанного моделирования с использованием физических и компактных (SPICE) моделей компонентов ИС с использованием модуля Setaurus Device.

#### **Требования к содержанию реферата:**

В реферате должна быть указана цель работы, обоснована ее актуальность, проведен анализ литературных источников, в том числе периодической литературы, представлен материал, включающий анализ возможностей современных САПР, используемых на разных уровнях проектирования СБИС и СНК, принципов действия новых приборов и их

характеристик, особенностей инновационных технологий, внедренных для реализации производства в последние 15 лет.

В заключении представляются выводы по работе.

#### **Контрольные вопросы к опросам:**

- Основные задачи, решаемые в процессе развития микроэлектроники.
- Цена технологических инноваций.
- Комплекс средств, обеспечивающих рост функциональных возможностей микроэлектроники.
- Появление систем на кристалле (SOC) – следствие действия закона Мура.
- Разновидности технологии масштабирования.
- Технологические проблемы реализации шин металлизации на базе меди.
- Назначение и особенности реализации технологии напряженного (strain) кремния.
- Базовые концепции построения современных САПР микро- и нанoeлектроники.
- Назначение и технологии создания Low-*k* диэлектриков.
- Технологии изготовления и типы используемых High-*K* диэлектриков.
- Использование в КМОП технологии сплавов SiGe.
- Особенности технологии напряженного (strain) кремния для реализации МОП транзисторов с каналами n- и p-типов.
- Проблемы и конкурентные преимущества технологии кремний на диэлектрике (SOI).
- Особенности и физический принцип работы трехмерных МОП транзисторов (FinFET).
- Базовые концепции построения современных САПР микро- и нанoeлектроники.
- Задачи, решаемые с помощью имитационного моделирования.
- Виды моделирования и соответствующие им примитивы.
- Системный подход. Основные понятия общей теории систем.
- Уровни проектирования СБИС.
- Задачи схемотехнического моделирования СБИС.
- Возможные варианты сокращения цикла проектирования СБИС.
- Средства интеграции, используемых на разных уровнях проектирования ИС.
- Основные проектные процедуры полного цикла проектирования ИС.
- Использование IP-блоков (ядер) при проектировании систем на кристалле

Практические занятия заключаются в ознакомлении с используемым для проектирования СБИС и СНК программным обеспечением, представленным в разделе 7: САПР TCAD Sentaurus; семейства SPICE-подобных систем моделирования: студенческие версии AIM-SPICE и PSPICE, полнофункциональная версия CM LTSPICE; САПР Quartus, система визуального проектирования Simulink, САПР проектирования топологии MicroWind. Изучение описаний программных средств выносится на самостоятельную работу. На практических занятиях решаются задачи по отдельным иерархическим уровням проектирования.

#### **Пример:**

Рассчитать ВАХ диода на p-n переходе и отобразить результаты расчета в полулогарифмическом масштабе с целью оценки влияния неидеальных эффектов, определяющих вклад различных механизмов токопереноса, на характеристики реального диода.

Для расчета использовать параметры SPICE-модели диода : **IS = 192,1 p; N = 1; XTI = 3; EG = 1,1; CJO = 893,8 f; M = 98,29 m; VJ = 0,75; FC = 0,5; BV = 5; IBV = 10u; NR = 2; ISR = 16,91n; RS = 0,1; IKF = 1e-2,**

## Расчет

Для расчета ВАХ диода напряжения воспользуемся программой AIM-Spice. Сформируем листинг программы для расчета ВАХ.

### Calculation Voltage-Ampere Curves

```
Vp 1 0 dc 10
r1 1 2 1k
d1 2 0 kd522a
.model kd522a d is=880.5E-18 rs=.25 ikf=0 n=1
+ xti=3 eg=1.11 cjo=175p m=0.5516 vj=.75 fc=.5
+ isr=1.859n nr=2 bv=4.7 ibv=20.245m
```

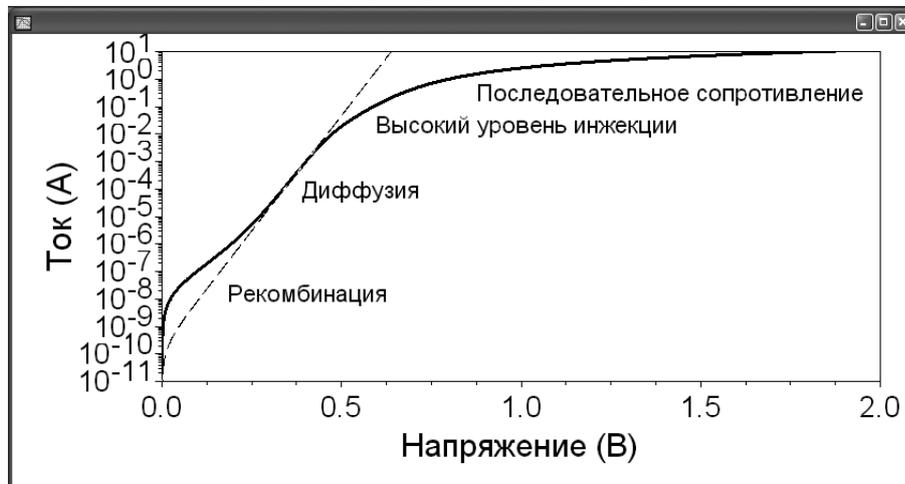
Открываем программу AIM-SPICE и скопируем листинг описания схемы в ее окно.

Проверяем правильность синтаксиса описания схемы путем расчета параметров рабочей точки, нажав на панели инструментов кнопку **OP (Operating Point, Рабочая точка)**.

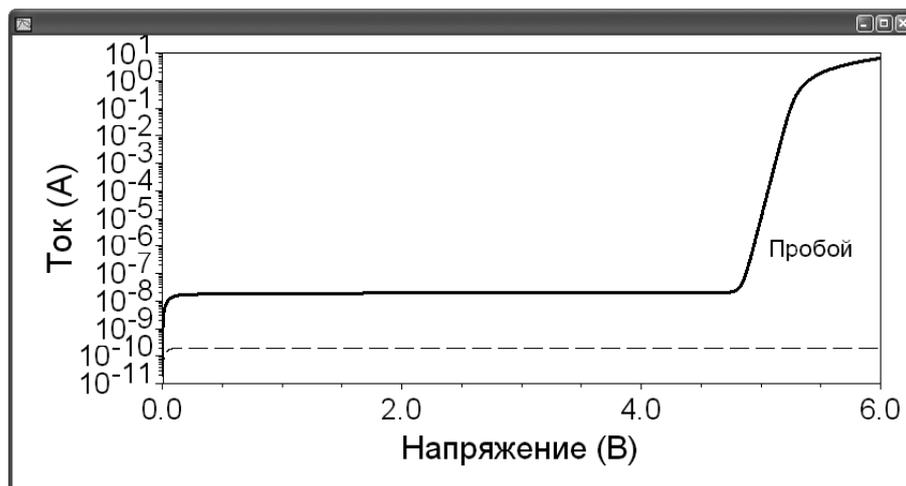
Затем, нажав на панели инструментов кнопку **DC (Direct Current)**, выполняем расчет ВАХ.

Запускаем постпроцессор AIM-Postprocessor и выполняем редактирование полученного графика.

Ниже приведены результаты выполненного расчета.



*a*



б

Смоделированные с помощью программы AIM-Spice прямые (а) и обратные ветви (б) ВАХ идеального (штриховая кривая) и реального (сплошная кривая) кремниевого диода на  $p-n$ -переходе

**Аудиторная и внеаудиторная самостоятельная работа аспирантов** заключается в подготовке к практическим занятиям, опросу, написании рефератов, в подготовке к зачету.

**Вопросы для подготовки к зачету:**

1. Типы САПР, используемых для проектирования ИС.
2. Проблемы моделирования FINFET транзисторов.
3. Отображение результатов моделирования в программных модулях Svisual и Inspect TCAD Sentaurus.
4. Современное состояние средств приборно-технологического проектирования.
5. Квантовые эффекты и их учет в моделировании процессов и структур нанотехнологии.
6. Возможность интеграции системного этапа проектирования с функционально-логическим и схемным этапами проектирования ИС в программе Simulink.
7. Организация математического эксперимента в модуле Sentaurus Workbench САПР TCAD Sentaurus.
8. Физическая интерпретация параметров SPICE модели Гуммеля-Пуна биполярного транзистора.
9. Приведите процедуру разработки оригинальных моделей функциональных блоков СНК в программе Simulink.
10. Выполните анализ эффективности использования аппаратных языков VHDL и Verilog на конкретном примере реализации функционального модуля.
11. Сформулируйте алгоритм создания командного файла для моделирования технологического процесса в Sentaurus Process.
12. Выполните построение топологии и схемотехническое моделирование инвертора в САПР Microwind.
13. Сделайте обзор возможных вариантов реализации High-K подзатворных диэлектриков.

Таблица А.1 – Организация изучения дисциплины «Проектирование и технология современных приборов микро- и нанoeлектроники»

Раздел модуля	Технология и форма проведения занятий	Задания на СРС	Дополнительная литература и интернет-ресурсы
<b>УЭМ1 Основные технологические инновации, внедренные в производство микро- и нанoeлектронных приборов за последние 15 лет</b>			
1.1 Эволюция развития интегральной технологии	– вводная лекция	– изучение дополнительной литературы	1 Красников Г.Я. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов / Г.Я.Красников. – 2-е изд., испр. – М.: Техносфера, 2011. – 799 с. 2 Рабаи Жан М. Цифровые интегральные схемы: Методология проектирования / Жан М.Рабаи, Антанта Чандракасан, Боривож Николич. – 2-е издание.: пер. с англ. – М.: ООО «И.Д. Вильямс», 2007. – 912 с.
1.2 Основные прорывные технологии при создании КМОП ИС за последние 15 лет	– опрос – информационная лекция – решение задач с обсуждением результатов – доклад	– изучение литературы по теме – подготовка к практическим занятиям – подготовка к опросу – подготовка реферата	3 Нано-КМОП-схемы и проектирование на физическом уровне / Б.П.Вонг, А.Миттал, Ю.Цао, Г.Старр. – М.: Техносфера, 2014. – 432 с.
<b>УЭМ2 САПР, СМ и модели, используемые при проектировании элементной базы микро- и нанoeлектроники</b>			
2.1 Суть имитационного моделирования	– обсуждение результатов рубежного контроля по УЭМ1 – информационная лекция – решение задач с обсуждением результатов – опрос	– изучение дополнительной литературы – подготовка к практическим занятиям; – подготовка к опросу – подготовка реферата	1 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. 2 Петров М.Н. Системное моделирование в среде SIMULINK / М.Н.Петров, К.Г.Лукин. – В.Новгород: ЗАО «Новгородский технопарк», 2013. – 82 с. 3 Петров М.Н. Разработка цифровых схем с использованием языков описания аппаратуры в среде САПР Quartus II / М.Н.Петров, В.Н.Петров, В.А.Стащенко. – В.Новгород: НовГУ им. Ярослава Мудрого, 2014. – 96 с.
2.2 Иерархия СБИС. Системы автоматизированного проектирования СБИС и СНК	– информационная лекция – опрос – проведение ПЗ – доклад	– изучение дополнительной литературы – решение задач – подготовка к опросу	4 Петров М.Н. Моделирование микroeлектронных компонентов и схем с помощью программы AIM-SPICE: учебное пособие; НовГУ им. Ярослава Мудрого. – В.Новгород, 2014. – 72 с. 5 Петров М.Н. Использование САПР TCAD Synopsys для оптимизации технологического процесса изготовления PIN диода: уч. пособие; НовГУ им. Ярослава Мудрого. – В.Новгород, 2019. – 82 с. 6 Казеннов Г.Г. Основы проектирования интегральных схем и систем. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2005. – 295 с.

**Приложение Б**  
(обязательное)

**Технологическая карта**  
**дисциплины «Проектирование и технология современных приборов микро- и нанoeлектроники»**  
**семестр 5 , ЗЕТ 3 , вид аттестации Зачет , акад.часов 108 , баллов рейтинга 150**

Номер и наименование раздела учебной дисциплины, КП/КР	Номер недели семестра	Трудоемкость, ак.час			Форма текущего контроля успеv. (в соотв. с паспортом ФОС)	Шифры ИДРО	Максим. кол-во баллов рейтинга
		Контактная работа (аудиторные занятия)		СРС			
		ЛЕК	ПЗ				
<i>УЭМ1 Основные технологические инновации, внедренные в производство микро- и нанoeлектронных приборов за последние 15 лет</i>	<b>1-9</b>	<b>5</b>	<b>3</b>	<b>46</b>			<b>65</b>
1.1 Эволюция развития интегральной технологии	1-4	2	1	19	практическое задание	УК-6, ПК-2(У2), ПК-4(32), ПК-4(У1), ПК-4(У4)	15
					опрос		5
1.2 Основные прорывные технологии при создании КМОП ИС за последние 15 лет	4-9	3	2	27	практическое задание	УК-6, ПК-2(33), ПК-2(У2), ПК-2(У3), ПК-3(У3)	15
					опрос		5
					реферат		25
<i>УЭМ2 САПР, СМ и модели, используемые при проектировании элементной базы микро- и нанoeлектроники</i>	<b>10-18</b>	<b>5</b>	<b>3</b>	<b>46</b>			<b>65</b>
2.1 Суть имитационного моделирования	10-13	2	1	19	практическое задание	ОПК-1, ПК-1 (32,33), ПК-2(У4), ПК-2(В2), ПК-3(У2), ПК-4(33), ПК-4(У2), ПК-4(У3), ПК-4(В2,В3)	15
					опрос		5
2.2 Иерархия СБИС. Системы автоматизированного проектирования СБИС и СНК	14-18	3	2	27	практическое задание	УК-6, ОПК-1, ПК-1(32), ПК-2(33), ПК-2(У4), ПК-2(В2), ПК-3(У2), ПК-4(33), ПК-4(У3), ПК-4(В3)	15
					опрос		5
					реферат		25
Промежуточная аттестация (семестровая контроль)					Зачет	УК-6, ОПК-1, ПК-1, ПК-2, ПК-3, ПК-4	20
<b>Итого:</b>	<b>18</b>	<b>10</b>	<b>6</b>	<b>92</b>			<b>150</b>

В соответствии с положениями «О балльно-рейтинговой системе обучения аспирантов и ординаторов по программам высшего образования – программам подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре и ординатуре» и «О фонде оценочных средств для проведения текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации студентов и итоговой аттестации выпускников» перевод баллов рейтинга в традиционную систему оценок осуществляется по шкале:

- отлично – (90-100) % от 135 до 150 баллов;
- хорошо – (70-89) % от 105 до 134 баллов;
- удовлетворительно – (50-69) % от 75 до 104 баллов;
- неудовлетворительно – менее 50 %, т.е. меньше 75 баллов.

**Приложение В**  
(обязательное)  
**Карта учебно-методического обеспечения**

**Дисциплины (модуля)** «Проектирование и технология современных приборов микро- и наноэлектроники»

Направление **11.06.01** Электроника, радиотехника и системы связи

Направленность Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах

Формы обучения очная

Курс 3 Семестр 5

Часов: всего 108, лекций 10, практ. зан. 6,

СРС и виды индивидуальной работы 92

Таблица В.1 - Обеспечение Дисциплины «Проектирование и технология современных приборов микро- и наноэлектроники» учебными изданиями

Библиографическое описание* издания (автор, наименование, вид, место и год издания, кол. стр.)	Кол. экз. в библ. НовГУ	Наличие в ЭБС
Учебники и учебные пособия		
1 Петров М.Н., Лукин К. Г. Системное моделирование в среде SIMULINK. – В.Новгород: ЗАО «Новгородский технопарк», 2013. – 82 с.	3 (10 на каф.)	<a href="https://novsu.bibliotech.ru/Reader/Book/-2060">https://novsu.bibliotech.ru/Reader/Book/-2060</a>
2 Петров М.Н., Петров В.Н., Стащенко В.А. Разработка цифровых схем с использованием языков описания аппаратуры в среде САПР Quartus II. – В.Новгород: НовГУ им. Ярослава Мудрого, 2014. – 96 с.	3 (10 на каф.)	<a href="https://novsu.bibliotech.ru/Reader/Book/-2051">https://novsu.bibliotech.ru/Reader/Book/-2051</a>
3 Петров М.Н. Моделирование микроэлектронных компонентов и схем с помощью программы AIM-SPICE: учебное пособие. – НовГУ им. Ярослава Мудрого. – В.Новгород, 2014. – 72 с.	10 (10 на каф.)	<a href="https://novsu.bibliotech.ru/Reader/Book/-2185">https://novsu.bibliotech.ru/Reader/Book/-2185</a>
4 Казеннов Г.Г. Основы проектирования интегральных схем и систем.- М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2005. – 295 с.	6	
Учебно-методические издания		
1 Рабочая программа дисциплины с приложениями «Проектирование и технология современных приборов микро- и наноэлектроники» / Автор-сост. М.Н. Петров; НовГУ им. Ярослава Мудрого. – Великий Новгород, 2018. – 23 с.		
2 Петров М.Н. Использование САПР TCAD Synopsys для оптимизации технологического процесса изготовления PIN диода: уч. пособие. – НовГУ им. Ярослава Мудрого. – В.Новгород, 2019. – 82 с.	В печати (эл. версия)	

Таблица В.2 – Информационное обеспечение дисциплины (модуля)

Название программного продукта, интернет-ресурса	Электронный адрес	Примечание
1 Сайт компании Synopsys	<a href="http://www.synopsys.com">http://www.synopsys.com</a>	
2 MicroWind & DSCH v 3.1 – Lite user's manual. Copyright 1997-2006 by INSA, University of Toulouse, France. – 113 p.	<a href="http://www.microwind.org">www.microwind.org</a>	
2. Etienne Sicard. MicroWind & DSCH v 3.5 User's Manual Lite Versio. – 2009 by INSA, University of Toulouse, France. – 130 p.	<a href="http://www.microwind.org">www.microwind.org</a>	
3 Сайт компании AIM-SPICE	<a href="http://www.aimspice.com">http://www.aimspice.com</a>	
4 Сайт компании Cadence	<a href="http://www.cadencepcb.com">http://www.cadencepcb.com</a>	
5 Сайт корпорации Linear Technology	<a href="http://www.linear.com">http://www.linear.com</a>	
6 Сайт компании разработчика Matlab и Simulink.	<a href="http://www.mathworks.com">www.mathworks.com</a>	
7 Русскоязычные информационные сайты Matlab и Simulink.	<a href="http://matlab.exponenta.ru">http://matlab.exponenta.ru</a> <a href="http://www.exponenta.ru">http://www.exponenta.ru</a>	

Таблица В.3 – Дополнительная литература

Библиографическое описание* издания (автор, наименование, вид, место и год издания, кол. стр.)	Кол. экз. в библ. НовГУ	Наличие в ЭБС
1 Электроника СБИС: проектирование микроструктур. Под ред. Айнспрука Н. – М.: Мир, 1989. – 256 с.	1	
2 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, [1] с.	15 (6 на каф.)	
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	
Петров М. Н. Моделирование компонентов и элементов интегральных схем : учеб. пособие для вузов / М. Н. Петров, Г. В. Гудков. - СПб. : Лань, 2018. - 462, [1] с.	2	
3 Рабаи Жан М., Чандракасан Антанта, Николич Боривож. Цифровые интегральные схемы: Методология проектирования, 2-е издание.: Пер. с англ. – М.: ООО “И.Д. Вильямс”, 2007. – 912 с	(1 на каф.)	
4 Вонг Б.П., Миттал А., Цао Ю., Старр Г. Нано-КМОП-схемы и проектирование на физическом уровне. – Москва: Техносфера, 2014.- 432 с.	(1 на каф.)	
5 Красников Г.Я. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов / Г.Я.Красников. – 2-е изд., испр. – М.: Техносфера, 2011. – 799 с.	4	

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

Зав. кафедрой \_\_\_\_\_

подпись

И.О.Фамилия

20..... г.

СОГЛАСОВАНО

НБ НовГУ:

\_\_\_\_\_

должность

\_\_\_\_\_

подпись

\_\_\_\_\_

расшифровка

