

Министерство науки и высшего образования 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



РАБОЧАЯ ПРОГРАММА

учебной дисциплины

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТРОЙСТВ И СИСТЕМ

по направлению подготовки

11.04.04 Электроника и нанoeлектроника

Направленность (профиль) Микро- и нанoeлектронные устройства

СОГЛАСОВАНО

Начальник отдела обеспечения
деятельности ИЭИС

П.В.Лысухо
« 05 » апреля 2019 г.

Разработал

Профессор КФТТМ

М.Н.Петров
« 30 » января 2019 г.

Принято на заседании кафедры ФТТМ

Протокол № 5 от 01.02 2019 г.

Заведующий кафедрой

Б.И. Селезнев
« 01 » 02 2019 г.

1 Цели освоения учебной дисциплины

Цель освоения учебной дисциплины: формирование компетентности студентов в области расчета и моделирования компонентов современных интегральных схем (СБИС, памяти и систем на кристалле) с использованием средств приборно-технологической САПР (TCAD).

Задачи:

- а) сформировать у обучающихся представление об особенностях разработки физических и математических моделей технологических процессов и компонентов ИС;
- б) подготовить обучающихся к использованию имеющихся компьютерных моделей приборов, схем, устройств и систем для применения в профессиональной сфере;
- в) научить разработке компьютерных моделей новых приборов и технологических процессов с целью реализации оригинальных изделий и систем, отсутствующих на рынке.

2 Место учебной дисциплины в структуре ОПОП

Учебная дисциплина относится к обязательной части учебного плана основной профессиональной образовательной программы направления подготовки 11.04.04 Электроника и нанoeлектроника и направленности (профилю) Микро- и нанoeлектронные устройства (далее – ОПОП). В качестве входных требований выступают сформированные ранее компетенции обучающихся, приобретенные ими в рамках следующих дисциплин, изученных студентами при подготовке по направлению 11.03.04 Электроника и нанoeлектроника: «Физика конденсированного состояния», «Микроэлектроника и твердотельная электроника», «Схемотехника», «Элементная база СБИС», «Проектирование цифровых устройств».

Освоение учебной дисциплины является компетентностным ресурсом для дальнейшего изучения и выполнения научно-исследовательской работы (НИР), предусмотренной данной магистерской программой.

3 Требования к результатам освоения учебной дисциплины

Перечень компетенций, которые формируются в процессе освоения учебной дисциплины:

общепрофессиональные компетенции:

- ОПК-2 Способен применять современные методы исследования, представлять и аргументировано защищать результаты выполненной работы;
- ОПК-3 Способен приобретать и использовать новую информацию в своей предметной области, предлагать новые идеи и подходы к решению инженерных задач.

Результаты освоения учебной дисциплины представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты освоения учебной дисциплины

Код и наименование компетенции	Результаты освоения учебной дисциплины (индикаторы достижения компетенций)		
ОПК-2 Способен применять современные методы исследования, представлять и аргументировано защищать результаты выполненной работы	Знать методы синтеза и исследования моделей	Уметь адекватно ставить задачи исследования и оптимизации сложных объектов на основе методов математического моделирования	Владеть навыками методологического анализа научного исследования и его результатов
ОПК-3 Способен приобретать и использовать новую информацию в своей предметной области, предлагать новые идеи и подходы к решению инженерных задач	Знать принципы построения локальных и глобальных компьютерных сетей, основы Интернет-технологий, типовые процедуры применения проблемно-ориентированных прикладных программных средств в дисциплинах профессионального цикла и профессиональной сфере деятельности	Уметь использовать современные информационные и компьютерные технологии, средства коммуникаций, способствующие повышению эффективности научной и образовательной сфер деятельности	Владеть методами математического моделирования приборов и технологических процессов с использованием современных информационных технологий

4 Структура и содержание учебной дисциплины

4.1 Трудоемкость учебной дисциплины

Таблица 2 – Трудоемкость учебной дисциплины для очной формы обучения

Части учебной дисциплины (модуля)	Всего	Распределение по семестрам
		1 семестр
1. Трудоемкость учебной дисциплины (модуля) в зачетных единицах (ЗЕТ)	3	3
2. Контактная аудиторная работа в академических часах (АЧ)	27	27
3. Курсовая работа/курсовой проект (АЧ) <i>(при наличии)</i>	-	-
4. Внеаудиторная СРС в академических часах (АЧ)	81	81
5. Промежуточная аттестация <i>(зачет; дифференцированный зачет; экзамен) (АЧ)</i>	ДЗ	ДЗ

4.2 Содержание учебной дисциплины

Тема 1. Иерархия СБИС и уровни проектирования.

Тема 2. Общая классификация моделей. Модели приборного уровня.

Тема 3. Системы приборно-технологического моделирования (TCAD).

Тема 4. Численное решение фундаментальной системы уравнений (ФСУ) в дрейфово-диффузионном приближении.

Тема 5. Математические модели, используемые для вычисления подвижности электронов и дырок.

Тема 6. Математические модели, используемые для моделирования процессов рекомбинации и генерации.

Тема 7. Математические модели, используемые для моделирования процессов туннелирования носителей.

Тема 8. Численное решение фундаментальной системы уравнений (ФСУ) в гидродинамическом приближении.

Тема 9. Основные алгоритмы, используемые для дискретизации базовых уравнений при численном моделировании компонентов ИС.

4.3 Трудоемкость разделов учебной дисциплины и контактной работы

Таблица 3 – Трудоемкость разделов учебной дисциплины и контактной работы

№	Наименование разделов (тем) учебной дисциплины (модуля), УЭМ, наличие КП/КР	Контактная работа (в АЧ)				Внеауд. СРС (в АЧ)	Формы текущего контроля
		Аудиторная			В т.ч. СРС		
		ЛЕК	ПЗ	ЛР			
1.	Иерархия СБИС и уровни проектирования	1	2			7	решение задач
2.	Общая классификация моделей. Модели приборного уровня	1	2			7	решение задач
3.	Системы приборно-технологического моделирования (TCAD)	1	2		1	7	решение задач
4.	Численное решение фундаментальной системы уравнений (ФСУ) в дрейфово-диффузионном приближении	1	2		1	7	решение задач
5.	Математические модели, используемые для вычисления подвижности электронов и дырок	1	2		1	7	решение задач
6.	Математические модели, используемые для моделирования процессов рекомбинации и генерации	1	2			7	решение задач
7.	Математические модели, используемые для моделирования процессов туннелирования носителей	1	2		1	7	решение задач
8.	Численное решение фундаментальной системы уравнений (ФСУ) в гидродинамическом приближении	1	2		1	7	решение задач
9.	Основные алгоритмы, используемые для дискретизации базовых уравнений при численном моделировании компонентов ИС	1	2			7	решение задач
						18	реферат
	Промежуточная аттестация						ДЗ
	ИТОГО	9	18		5	81	

4.4 Лабораторные работы и курсовые работы/курсовые проекты

4.4.1 Перечень тем лабораторных работ:

Лабораторные работы не предусмотрены учебным планом.

4.4.2 Примерные темы курсовых работ/курсовых проектов:

Курсовые работы/курсовые проекты не предусмотрены учебным планом.

5 Методические рекомендации по организации освоения учебной дисциплины

Таблица 4 – Методические рекомендации по организации лекций

№	Темы лекционных занятий (форма проведения)	Трудоемкость в АЧ
1	Иерархия СБИС и уровни проектирования. Виды моделирования и соответствующие им примитивы. Разновидности иерархического проектирования. Многоуровневое моделирование. Преимущества иерархического подхода (вводная лекция)	1
2	Общая классификация моделей. Модели приборного уровня. Экономичность и универсальность имитационных моделей. Задачи приборного моделирования СБИС. (информационная лекция)	1
3	Системы приборно-технологического моделирования (TCAD). Введение в САПР SENTAURUS TCAD. Программа Sentaurs Device - универсальный модуль для моделирования разнообразных характеристик полупроводниковых устройств. Основные особенности и возможности этого модуля (информационная лекция)	1
4	Методы численного моделирования микроэлектронных приборов. Фундаментальная система уравнений (ФСУ) в дрейфово-диффузионном приближении (двух уравнений непрерывности для электронов и дырок и уравнения Лапласа), решаемая относительно трех переменных: потенциала ϕ , квазиуровней Ферми для электронов ϕ_n и дырок ϕ_p (информационная лекция)	1
5	Математические модели, используемые для вычисления подвижности μ в объеме полупроводника: Masetti, Arora, University of Bologna, pmi_msc_mobility и с учетом поверхностного рассеивания: Enhanced Lombardi Model, University of Bologna Surface Mobility Model и Philips Unified Mobility Model (информационная лекция)	1
6	Математические модели, используемые для моделирования процессов рекомбинации R: Шокли-Рида-Холла, концентрационная и температурные модели Шокли-Рида-Холла, Оже рекомбинация. Математические модели, используемые для моделирования процессов генерации носителей ударной ионизацией G: van Overstraeten (используемая по умолчанию), Okuto, Lackner, UniBo и UniBo2. (информационная лекция)	1
7	Математические модели, используемые для моделирования процессов туннелирования носителей: Fowler–Nordheim, Direct Tunneling, Nonlocal Tunneling Model. Математические модели, используемые для расчета собственной концентрации носителей в полупроводнике n_i (информационная лекция)	1
8	Методы численного моделирования наноэлектронных приборов. Фундаментальная система уравнений в гидродинамическом приближении (из шести базовых уравнений в частных производных второго порядка), решаемая относительно шести переменных: потенциала ϕ , квазиуровней Ферми для электронов ϕ_n и дырок ϕ_p , температуры электронов T_e и дырок T_h и температуры решетки T . Учет зависимостей подвижности и скорости рекомбинации-генерации от температуры носителей. Учет эффектов квантования энергии носителей в направлении перпендикулярном затвору с помощью аналитической поправки по формуле Ван Дорта (Quantum_van_Dort) или с помощью системы уравнений Density_Gradient (DG) (информационная лекция)	1
9	Основные алгоритмы, используемые для дискретизации базовых уравнений при численном моделировании микроэлектронных приборов. Метод конечных разностей (МКР). Метод конечных элементов (МКЭ). Алгоритм построения сетки методом триангуляции Делоне. Алгоритм разбиения Дирихле. Численное решение системы нелинейных алгебраических уравнений методом Ньютона. Граничными условия, используемые для решения ФСУ: граничное условие первого рода (Дирихле); граничное условие второго рода (информационная лекция)	1
	ИТОГО	9

Таблица 5 – Методические рекомендации по организации практических занятий

№	Темы практических занятий (форма проведения)	Трудоемкость в АЧ
1	Моделирование температурной зависимости диодных характеристик (решение задач)	2
2	Моделирование переходного процесса при переключении диода (решение задач)	2
3	Расчет вольт-фарадной характеристики диода (решение задач)	2
4	Моделирование ВАХ биполярного транзистора (решение задач)	2
5	Расчет зависимости коэффициента усиления тока в схеме с ОЭ от режима работы (решение задач)	2
6	Моделирование ВАХ МОП-транзистора (решение задач)	2
7	Реализация двух алгоритмов расчета таблицы истинности цифровых вентилях (решение задач)	2
8	Расчет передаточной характеристики вентиля (решение задач)	2
9	Расчет переходных характеристик вентиля (решение задач)	2
	ИТОГО	18

Рекомендации к проведению лекционных занятий.

Основное содержание теоретической части излагается преподавателем на лекционных занятиях, а также усваивается студентом при знакомстве с дополнительной литературой, которая предназначена для более глубокого овладения дисциплиной.

Дополнительная литература, не вошедшая в таблицу Б.2.

1 Электронная версия Sentaurs Device User Guide.pdf Version D-2010.03, March 2010 – 1286 p.

2 Technology computer aided design. Simulation for VLSI MOSFET. – Ed. by Sarkar Chandan Kumar. – CRC Press, 2013. – 445 p.

3 Yue Fu e.a. Integrated power devices and TCAD simulation. – CRC Press, 2014. – 335 p.

4 Dragica Vasileska и Stephen M. Goodnick. Computational Electronics. – N-Y.: Morgan & Claypool, 2006. – 216 p.

5 Петров М.Н. Разработка шаблона для моделирования КМОП инвертора в САПР TCAD Sentaurs: монография [электронный ресурс] / НовГУ им. Ярослава Мудрого. – Великий Новгород, 2016. – 71 с.

Рекомендации к проведению практических занятий.

1. Решение задач.

Подробное рассмотрение решений типовых задач средствами приборной технологической САПР TCAD Sentaurs приведено в учебном пособии: Петров М.Н. Разработка шаблона для моделирования КМОП инвертора в САПР TCAD Sentaurs: монография [электронный ресурс] / НовГУ им. Ярослава Мудрого. – Великий Новгород, 2016. – 71 с.

Пример задачи:

Задача 1.

Рассчитать пороговое напряжение n -канального МДП-транзистора с поликремниевым затвором n +-типа, имеющего параметры:

длина канала $L = 5$ мкм; ширина канала $w = 5$ мкм; концентрация примеси в подложке $N_B = 10^{15} \text{ см}^{-3}$; толщина диэлектрика (SiO_2) $d = 0,1$ мкм; подвижность электронов в канале $\mu_n = 700 \text{ см}^2/\text{В.с}$; плотность поверхностных состояний на границе Si-SiO_2 $N_{ss} = 10^{11} \text{ см}^{-2}$ ($Q_{ss} > 0$); напряжение подложка-исток равно нулю.

2. Реферат.

Самостоятельно изученные теоретические материалы оформляются в виде рефератов, которые обсуждаются на практических занятиях. Студенты в течение семестра должны написать и защитить по одному реферату на любую тему из предложенных преподавателем.

6 Фонд оценочных средств учебной дисциплины

Фонд оценочных средств представлен в Приложении А.

7 Условия освоения учебной дисциплины

7.1 Учебно-методическое обеспечение

Учебно-методического обеспечение учебной дисциплины представлено в Приложении Б.

7.2 Материально-техническое обеспечение

Таблица 6 – Материально-техническое обеспечение учебной дисциплины

№	Требование к материально-техническому обеспечению	Наличие материально-технического оборудования и программного обеспечения
1.	Наличие учебной аудитории	Учебная мебель, доска
2.	Мультимедийное оборудование	ПК IBM ATX Inwia S500 с подключением к сети «Интернет», монитор 17/КК/м, проектор Epson EMP-X5, экран подвесной (800x600)
	Программное обеспечение	Microsoft Windows 7 Professional; Dreamspark (Imagine) № 6002662113, 6002662119, 6002662110, 6002662108, 370aef61-476a-4b9f-bd7c-84bb13374212 Акт предоставления прав № Tr023734 от 29.04.2015: «Права на программы для ЭВМ DreamSpark Premium Online 3 Years», срок: 3 года (с апреля 2015 г. по апрель 2018 г.) Поставщик: ЗАО «СофтЛайн Трейд» Kaspersky Endpoint Security Standard; Лицензия № 1C1C-160801-082918-943-340 (кол-во объектов: 700 users), поставщик: ООО «Системная интеграция», срок пользования ПО: с 01.08.2016г. по 16.08.2018г

Приложение А (обязательное)

Фонд оценочных средств учебной дисциплины «Математическое моделирование устройств и систем»

1 Структура фонда оценочных средств

Фонд оценочных средств состоит из двух частей:

а) открытая часть - общая информация об оценочных средствах (название оценочных средств, проверяемые компетенции, баллы, количество вариантов заданий, методические рекомендации для применения оценочных средств и пр.), которая представлена в данном документе, а также те вопросы и задания, которые могут быть доступны для обучающегося;

б) закрытая часть - фонд вопросов и заданий, которая не может быть заранее доступна для обучающихся (экзаменационные билеты, вопросы к контрольной работе и пр.) и которая хранится на кафедре.

2 Перечень оценочных средств текущего контроля и форм промежуточной аттестации

Таблица А.1 – Перечень оценочных средств

№	Оценочные средства для текущего контроля	Разделы (темы) учебной дисциплины	Баллы	Проверяемые компетенции
1.	Решение задач	Темы с 1 по 9	15x9	ОПК-2, ОПК-3
2	Реферат		15x1	
<i>Промежуточная аттестация</i>				
	Дифференцированный зачет		-	
	ИТОГО		150	

3 Рекомендации к использованию оценочных средств

1) Решение задач

<i>Критерии оценки</i>	<i>Количество вариантов заданий</i>
Способен правильно подобрать нужные формулы и правильно их применить	2

2) Реферат

<i>Критерии оценки</i>	<i>Количество вариантов заданий</i>
Соответствие содержания теме и плану реферата	11
Умение обобщать и делать выводы	
Соблюдение требований к оформлению	
Выдержан объем	
Даны правильные ответы на дополнительные вопросы	

Темы рефератов:

1. Современное состояние средств приборно-технологического проектирования.
2. Наноразмерная полупроводниковая электроника: пути развития и проблемы.
- 3 Роль средств приборно-технологического проектирования в проектировании наноэлектронной компонентной базы.
4. Использование приборно-технологического моделирования в разработке и производстве устройств электроники.
5. Повышение степени интеграции - основной путь развития современной микро- и наноэлектроники.
6. КМОП-структуры как наиболее перспективный элемент для СБИС.
7. Трехмерные ИС - следующий этап развития полупроводниковой электроники.
8. Размерные эффекты и их учет в моделировании процессов и структур нанотехнологии.
9. Квантовые эффекты и их учет в моделировании процессов и структур нанотехнологии.
10. Особенность проектировании систем на кристалле (SoC).
11. Основные фирмы-разработчики IP-модулей.

Все материалы для проведения промежуточного контроля хранятся на кафедре.

Карта учебно-методического обеспечения
учебной дисциплины «Математическое моделирование устройств и систем»

Библиографическое описание издания (автор, наименование, вид, место и год издания, кол. стр.)	Кол. экз. в библ. НовГУ	Наличие в ЭБС
Печатные источники		
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, [1] 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	
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	
Электронные ресурсы		
1 Сайт компании Synopsys, одного из лидеров в разработке САПР изделий электронной техники http://www.synopsys.com		

Библиографическое описание издания (автор, наименование, вид, место и год издания, кол. стр.)		Кол. экз. в библ. НовГУ	Наличие в ЭБС
Печатные источники			
1 Нано-КМОП-схемы и проектирование на физическом уровне / Б.П.Вонг, А.Митгал, Ю.Цао, Г.Стар. – М.: Техносфера, 2014. – 432с.	1 (на каф.)		
Электронные ресурсы			
1			
2			

Зав. кафедрой _____ Б.И.Семезнев
подпись И.О.Фамилия
« 01 » 02 2019 г.

Приложение В
(обязательное)

Лист актуализации рабочей программы
учебной дисциплины «Математическое моделирование устройств и систем»

Рабочая программа актуализирована на 20__/20__ учебный год.
Протокол № ____ заседания кафедры от « ____ » _____ 20__ г.
Разработчик: _____
Зав. кафедрой _____

Рабочая программа актуализирована на 20__/20__ учебный год.
Протокол № ____ заседания кафедры от « ____ » _____ 20__ г.
Разработчик: _____
Зав. кафедрой _____

Рабочая программа актуализирована на 20__/20__ учебный год.
Протокол № ____ заседания кафедры от « ____ » _____ 20__ г.
Разработчик: _____
Зав. кафедрой _____

Таблица В.1 – Перечень изменений, внесенных в рабочую программу:

Номер изменения	№ и дата протокола заседания кафедры	Содержание изменений	Зав.кафедрой	Подпись