

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Воронежский государственный технический университет»



УТВЕРЖДАЮ
Декан факультета электроники Небольсин В.А.
«30» августа 2017 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА

дисциплины

**«Математическое моделирование технологических
процессов и интегральных схем»**

Направление подготовки 11.03.04 Электроника и наноэлектроника

Профиль Микроэлектроника и твердотельная электроника

Квалификация выпускника бакалавр

Нормативный период обучения 4 года

Форма обучения очная

Год начала подготовки 2017

Автор программы

[Signature] / А.В. Арсентьев /

Заведующий кафедрой
Полупроводниковой элек-
троники и наноэлектроники

[Signature] / С. И Рембеза./

Руководитель ОПОП

[Signature] / С.И Рембеза./

Воронеж 2017

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ

1.1 Цели дисциплины

Цель изучения дисциплины: овладеть современными знаниями в области построения и использования математических моделей (ММ) технологических процессов создания полупроводниковых приборов и интегральных микросхем (ИМС), необходимыми будущим специалистам для успешной работы технологами и разработчиками на производстве

1.2 Задачи освоения дисциплины

Формирование у студентов теоретических и практических знаний о математических моделях полупроводниковых приборов и элементов ИМС, используемых для изучения физических процессов в полупроводниковых структурах, расчета их основных характеристик и параметров, ММ полупроводниковых приборов и элементов ИМС для схемотехнических расчетов и анализа электронных схем в дискретном и интегральном исполнении

2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОПОП

Дисциплина «Математическое моделирование технологических процессов и интегральных схем» относится к дисциплинам вариативной части блока Б1.

3. ПЕРЕЧЕНЬ ПЛАНИРУЕМЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

Процесс изучения дисциплины «Математическое моделирование технологических процессов и интегральных схем» направлен на формирование следующих компетенций:

ОПК-2 - способностью выявлять естественнонаучную сущность проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности, привлекать для их решения соответствующий физико-математический аппарат

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

ПКВ-1 - способность владеть современными методами расчета и проектирования микроэлектронных приборов и устройств твердотельной электроники, способность к восприятию, разработке и критической оценке новых способов их проектирования

ПКВ-4 - способностью разрабатывать модели исследуемых процессов, материалов, элементов, приборов, устройств твердотельной электроники и микроэлектронной техники

Компетенция	Результаты обучения, характеризующие сформированность компетенции
ОПК-2	Знать физико-математический аппарат технологических процессов

	Уметь выявлять естественнонаучную сущность проблем при моделировании
	Владеть навыками систематизации результатов моделирования
ОПК-7	Знать основы информационных технологий в своей профессиональной деятельности
	Уметь учитывать современные тенденции развития электроники, измерительной и вычислительной техники
	Владеть навыками оценки результатов моделирования
ПКВ-1	Знать о границах применения моделей
	Уметь использовать основные ММ, необходимые для анализа физических процессов в полупроводниках, позволяющие осуществлять физико-технологическое моделирование полупроводниковых приборов и элементов ИМС
	Владеть навыками проведения исследования ММ с помощью средств вычислительной техники
ПКВ-4	Знать о месте и роли ММ технологических процессов, полупроводниковых приборов и ИМС
	Уметь использовать основные ММ технологических процессов создания полупроводниковых структур, интегральных микросхем и дискретных полупроводниковых приборов
	Владеть навыками создания ММ для конкретных технологических процессов, полупроводниковых приборов и ИМС

4. ОБЪЕМ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

Общая трудоемкость дисциплины «Математическое моделирование технологических процессов и интегральных схем» составляет 5 з.е.

Распределение трудоемкости дисциплины по видам занятий

Очная форма обучения

Вид учебной работы	Всего часов	Семестры
		8
Аудиторные занятия (всего)	48	48
В том числе:		
Лекции	24	24
Практические занятия (ПЗ)	-	-
Лабораторные работы (ЛР)	24	24
Самостоятельная работа	105	105
Часы на контроль	27	27
Курсовой проект (есть)	+	+
Контрольная работа (нет)	-	-
Вид промежуточной аттестации (экзамен)	+	+
Общая трудоемкость академические часы зач. ед.	180	180
	5	5

5. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

5.1 Содержание разделов дисциплины и распределение трудоемкости по видам занятий

очная форма обучения

№ п/п	Наименование темы	Содержание раздела	Лекц	Прак зан.	Лаб. зан.	СРС	Всего, час
1	Понятие о математическом моделировании, моделях процессов и приборов.	Роль математического моделирования технологических процессов и полупроводниковых приборов в микроэлектронике. Иерархические уровни моделирования. Экономичность и универсальность моделей. Их классификация, история развития. Понятие о моделях отдельных процессов и приборов. Обзор пакетов прикладных программ моделирования технологических процессов и полупроводниковых приборов.	2	0	0	12	14
2	Численные методы моделирования	Классификация уравнений и граничных условий для моделирования полупроводниковых приборов и технологических процессов. Классификация и сравнительная характеристика численных методов, используемых для построения моделей. Метод конечных разностей. Основные понятия метода. Построение сетки. Построение разностных операторов разложением в ряд Тейлора.	2	0	0	12	14
3	Численные методы моделирования	Решение системы линейных алгебраических уравнений методом прогонки. Прямая прогонка, обратная прогонка. Пример. Реализация алгоритма на языке программирования C++.	2	0	4	10	16
4	Моделирование отдельных технологических операций	Математическое описание диффузии примесей. Диффузия легирующих примесей. Общие уравнения. Модель диффузии Ферми. Модель сегрегации примесей. Модель диффузии связанных пар примесей-дефект. Численные методы расчетов диффузионных моделей. Явный метод Эйлера, анализ устойчивости. Неявный метод Эйлера, анализ устойчивости.	2	0	4	10	16
5	Моделирование отдельных технологических операций	Модели ионной имплантации. Аналитические модели имплантации. Гауссово распределение ионно-имплантированных примесей. Распределение Пирсона ионно-имплантированных примесей. Моделирование имплантации методом Монте-Карло.	2	0	2	10	14
6	Моделирование отдельных технологических операций	Математическое описание процесса окисления кремния. Численная реализация модели окисления кремния. Модель Дила-Гроува. Роль точечных дефектов в кремнии при окислении. Ориентационная зависимость. Зависимость толщины оксида кремния от давления. Зависимость толщины оксида кремния от содержания хлора. Зависимость толщины оксида кремния от степени легирования	2	0	2	10	14
7	Моделирование отдельных технологических операций	Моделирование эпитаксии. Перераспределение примеси на границе при эпитаксии. Моделирование осаждения.	2	0	2	10	14
8	Математическое моделирование полупроводниковых приборов	САПР Tcad. Стандарт SUPREM. Обязательные команды и синтаксис.	4	0	4	10	18
9	Математическое моделирование	САПР Tcad. Настройка режимов расчета токов и напряжений.	4	0	4	10	18

	полупроводниковых приборов						
10	Математическое моделирование полупроводниковых приборов	САПР Tcad. Вывод результатов моделирования. Разрезы структуры, графики токов и напряжений.	2	0	2	11	15
Итого			24	0	24	105	153

5.2 Перечень лабораторных работ

1. Расчет процесса окисления по модели Дилла-Гроува в математическом пакете.
2. Расчет процесса ионной имплантации по модели Пирсона.
3. Расчет диффузии аналитическим и явным методом Эйлера в математическом пакете.
4. Моделирование диффузии неявным методом Эйлера на языке C++.
5. Задание геометрических областей прибора в САПР Tcad. Создание областей прибора с заданной концентрацией в САПР Tcad.
6. Расчет ВАХ прибора с помощью различных методов в САПР Tcad. Вывод графиков и структур в графопостроителе.
7. Моделирование диода в САПР Tcad.
8. Моделирование вертикального биполярного транзистора в САПР Tcad.
9. Моделирование горизонтального биполярного транзистора в САПР Tcad.

6. ПРИМЕРНАЯ ТЕМАТИКА КУРСОВЫХ ПРОЕКТОВ (РАБОТ) И КОНТРОЛЬНЫХ РАБОТ

В соответствии с учебным планом освоение дисциплины предусматривает выполнение курсового проекта в 8 семестре.

Примерная тематика курсового проекта: «Разработка технологического маршрута изготовления полупроводникового прибора по вариантам»

Задачи, решаемые при выполнении курсового проекта:

- Разработать технологический маршрут изготовления п/п.
- Сформировать структуру полупроводникового прибора.
- Задать режим моделирования электрических характеристик.

Курсовой проект включает исполняемый код проекта и расчетно-пояснительную записку.

Учебным планом по дисциплине «Математическое моделирование технологических процессов и интегральных схем» не предусмотрено выполнение контрольной работы в 8 семестре.

7. ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

7.1 Описание показателей и критериев оценивания компетенций на различных этапах их формирования, описание шкал оценивания

7.1.1 Этап текущего контроля

Результаты текущего контроля знаний и межсессионной аттестации оцениваются по следующей системе:

«аттестован»;

«не аттестован».

Компетенция	Результаты обучения, характеризующие сформированность компетенции	Критерии оценивания	Аттестован	Не аттестован
ОПК-2	Знать физико-математический аппарат технологических процессов	Активная работа на практических занятиях, отвечает на теоретические вопросы при защите курсового проекта	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах
	Уметь выявлять естественнонаучную сущность проблем при моделировании	Решение стандартных практических задач, написание курсового проекта	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах
	Владеть навыками систематизации результатов моделирования	Решение прикладных задач в конкретной предметной области, выполнение плана работ по разработке курсового проекта	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах
ОПК-7	Знать основы информационных технологий в своей профессиональной деятельности	Активная работа на практических занятиях, отвечает на теоретические вопросы при защите курсового проекта	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах
	Уметь учитывать современные тенденции развития электроники, измерительной и вычислительной техники	Решение стандартных практических задач, написание курсового проекта	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах
	Владеть навыками оценки результатов моделирования	Решение прикладных задач в конкретной предметной области, выполнение плана работ по разработке курсового проекта	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах
ПКВ-1	Знать о границах применения моделей	Активная работа на практических занятиях, отвечает на теоретические вопросы при защите курсового проекта	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах
	Уметь использовать основные ММ, необходимые для анализа физических процессов в полупроводниках, позволяющие осуществлять физико-технологическое моделирование полупроводниковых	Решение стандартных практических задач, написание курсового проекта	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах

	приборов и элементов ИМС			
	Владеть навыками проведения исследования ММ с помощью средств вычислительной техники	Решение прикладных задач в конкретной предметной области, выполнение плана работ по разработке курсового проекта	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах
ПКВ-4	Знать о месте и роли ММ технологических процессов, полупроводниковых приборов и ИМС	Активная работа на практических занятиях, отвечает на теоретические вопросы при защите курсового проекта	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах
	Уметь использовать основные ММ технологических процессов создания полупроводниковых структур, интегральных микросхем и дискретных полупроводниковых приборов	Решение стандартных практических задач, написание курсового проекта	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах
	Владеть навыками создания ММ для конкретных технологических процессов, полупроводниковых приборов и ИМС	Решение прикладных задач в конкретной предметной области, выполнение плана работ по разработке курсового проекта	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах

7.1.2 Этап промежуточного контроля знаний

Результаты промежуточного контроля знаний оцениваются в 8 семестре для очной формы обучения:

«отлично»;

«хорошо»;

«удовлетворительно»;

«неудовлетворительно»;

Компетенция	Результаты обучения, характеризующие сформированность компетенции	Критерии оценивания	Отлично	Хорошо	Удовл	Неудовл
ОПК-2	Знать физико-математический аппарат технологических процессов	Письменный ответ на вопрос, устный опрос	Полнота ответа 90-100%	Полнота ответа 80-90%	Полнота ответа 70-80%	Полнота ответа менее 70%
	Уметь выявлять естественнонаучную сущность проблем при моделировании	Письменный ответ на вопрос, устный опрос	Полнота ответа 90-100%	Полнота ответа 80-90%	Полнота ответа 70-80%	Полнота ответа менее 70%
	Владеть навыками систематизации результатов моделирования	Письменный ответ на вопрос, устный опрос	Полнота ответа 90-100%	Полнота ответа 80-90%	Полнота ответа 70-80%	Полнота ответа менее 70%
ОПК-7	Знать основы информационных технологий в своей профессиональной деятельности	Письменный ответ на вопрос, устный опрос	Полнота ответа 90-100%	Полнота ответа 80-90%	Полнота ответа 70-80%	Полнота ответа менее 70%
	Уметь учитывать современные тенденции развития электроники, измерительной и вычислительной техники	Письменный ответ на вопрос, устный опрос	Полнота ответа 90-100%	Полнота ответа 80-90%	Полнота ответа 70-80%	Полнота ответа менее 70%
	Владеть навыками оценки результатов моделирования	Письменный ответ на вопрос, устный опрос	Полнота ответа 90-100%	Полнота ответа 80-90%	Полнота ответа 70-80%	Полнота ответа менее 70%
ПКВ-1	Знать о границах применения моделей	Письменный ответ на вопрос, устный опрос	Полнота ответа 90-100%	Полнота ответа 80-90%	Полнота ответа 70-80%	Полнота ответа менее 70%
	Уметь использовать основные ММ, необходимые для анализа физических процессов в полупроводниках, позволяющие осуществлять физико-технологическое моделирование полупроводниковых приборов и элементов ИМС	Письменный ответ на вопрос, устный опрос	Полнота ответа 90-100%	Полнота ответа 80-90%	Полнота ответа 70-80%	Полнота ответа менее 70%
	Владеть навыками проведения исследования ММ с помощью средств вычислительной техники	Письменный ответ на вопрос, устный опрос	Полнота ответа 90-100%	Полнота ответа 80-90%	Полнота ответа 70-80%	Полнота ответа менее 70%
ПКВ-4	Знать о месте и роли ММ технологических процессов, полупроводниковых приборов и ИМС	Письменный ответ на вопрос, устный опрос	Полнота ответа 90-100%	Полнота ответа 80-90%	Полнота ответа 70-80%	Полнота ответа менее 70%
	Уметь использовать основные ММ технологических процессов создания полупроводниковых структур, интегральных микросхем и дискретных полупроводниковых приборов	Письменный ответ на вопрос, устный опрос	Полнота ответа 90-100%	Полнота ответа 80-90%	Полнота ответа 70-80%	Полнота ответа менее 70%
	Владеть навыками создания ММ для конкретных технологических	Письменный ответ на	Полнота ответа	Полнота ответа	Полнота ответа	Полнота ответа

	процессов, полупроводниковых приборов и ИМС	вопрос, устный опрос	90-100%	80-90%	70-80%	менее 70%
--	---	----------------------	---------	--------	--------	-----------

7.2 Примерный перечень оценочных средств (типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности)

7.2.1 Примерный перечень заданий для подготовки к тестированию

1. Модель объекта это...
 - 1) предмет похожий на объект моделирования
 - 2) объект - заместитель, который учитывает свойства объекта, необходимые для достижения цели!!
 - 3) копия объекта
 - 4) шаблон, по которому можно произвести точную копию объекта
2. Основная функция модели это:
 - 1) Получить информацию о моделируемом объекте
 - 2) Отобразить некоторые характеристические признаки объекта
 - 3) Получить информацию о моделируемом объекте или отобразить некоторые характеристические признаки объекта!!
 - 4) Воспроизвести физическую форму объекта
3. Математические модели относятся к классу...
 - 1) Изобразительных моделей
 - 2) Прагматических моделей
 - 3) Познавательных моделей
 - 4) Символических моделей!!
4. Математической моделью объекта называют...
 - 1) Описание объекта математическими средствами, позволяющее выводить суждение о некоторых его свойствах при помощи формальных процедур!!
 - 2) Любую символическую модель, содержащую математические символы
 - 3) Представление свойств объекта только в числовом виде
 - 4) Любую формализованную модель
5. Методами математического моделирования являются ...
 - 1) Аналитический
 - 2) Числовой
 - 3) Аксиоматический и конструктивный!!
 - 4) Имитационный
6. Какая форма математической модели отображает предписание последовательности некоторой системы операций над исходными данными с целью получения результата:
 - 1) Аналитическая
 - 2) Графическая
 - 3) Цифровая
 - 4) Алгоритмическая!!

7. Объект, состоящий из вершин и ребер, которые между собой находятся в некотором отношении, называют...
- 1) Системой
 - 2) Чертежом
 - 3) Структурой объекта
 - 4) Графом!!
8. Эффективность математической модели определяется ...
- 1) Оценкой точности модели
 - 2) Функцией эффективности модели!!
 - 3) Соотношением цены и качества
 - 4) Простотой модели
9. Адекватность математической модели и объекта это...
- 1) Правильность отображения в модели свойств объекта в той мере, которая необходима для достижения цели моделирования!!
- 2) Полнота отображения объекта моделирования
 - 3) Количество информации об объекте, получаемое в процессе моделирования
 - 4) Объективность результата моделирования
10. Состояние объекта определяется ...
- 1) Количеством информации, полученной в фиксированный момент времени
 - 2) Множеством свойств, характеризующим объект в фиксированный момент времени относительно заданной цели!!
 - 3) Только физическими данными об объекте
 - 4) Параметрами окружающей среды

7.2.2 Примерный перечень заданий для решения стандартных задач

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?

4. Процесс ионной имплантации в аморфном полупроводнике описывается с помощью распределения:

- а) распределение Гаусса;
- б) двойное сопряженное распределение Гаусса (асимметричное);
- в) распределение Гаусса с обобщенным экспоненциальным «хвостом»;
- г) распределение Пирсона-IV;
- д) распределение Пирсона-IV с линейно-экспоненциальным хвостом.

5. Наклон подложки относительно направления падения ионного пучка при проведении процесса ионной имплантации необходим для:

- а) предотвращения распыления материала с поверхности подложки;
- б) более равномерного распределения примеси в латеральном направлении;
- в) предотвращения явления каналирования ионов в монокристаллическом

полупроводнике;

- г) уменьшения нагрева поверхности подложки.

6. Количество введенной в полупроводник примеси в процессах диффузии и ионной имплантации характеризуется:

- а) полным количеством атомов примеси;
- б) концентрацией примеси;
- в) дозой примеси;
- г) дозой активной примеси.

7. При окислении кремния скорость протекания процесса определяется:

- а) скоростью поставки окислителя к поверхности кремния;
- б) скоростью диффузии окислителя в слое окисла по направлению к границе окисел-кремний;
- в) скоростью протекания химической реакции на поверхности окисла;
- г) скоростью протекания химической реакции на границе окисел-кремний.

8. При моделировании процесса окисления кремния учитываются:

- а) зависимость скорости процесса от температуры;
- б) зависимость скорости процесса от парциального давления компонентов окисляющей среды;
- в) зависимость скорости процесса от ориентации подложки, механических напряжений и уровня легирования;
- г) от всех перечисленных факторов.

9. Сегрегация примеси - это:

- а) явление перераспределения примеси между окислом и полупроводником, происходящие при высокой температуре из-за различия растворимости и коэффициентов диффузии примеси в полупроводнике и окисле;
- б) встраивание атомов примеси в кристаллическую решетку полупроводника;
- в) обеднение примесью поверхности полупроводника, происходящие при его нагреве в инертной среде;
- г) перераспределение примеси в объеме полупроводника при высокой температуре.

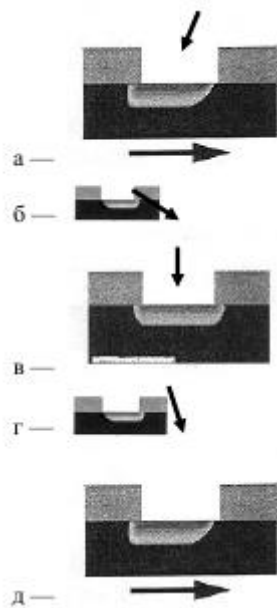
10. При расчете интенсивности освещения в пленке в процессе экспонирования фоторезиста можно НЕ учитывать следующие физические и химические факторы:

- а) нагрев пленки фоторезистора под действием освещения; !!
- б) интенсивность освещения на поверхности резистивной пленки;

- в) уменьшение интенсивности с глубиной, связанное с поглощением света материалом пленки;
- г) отражение света от подложки и возникновение вертикальных стоячих волн.

7.2.3 Примерный перечень заданий для решения прикладных задач

1. Для процесса ионной имплантации наиболее важным является учет:
 - а — электронного торможения;
 - б — упругих столкновений с ядрами атомов;
 - в — неупругих столкновений с ядрами атомов;
 - г — электронного и ядерного упругого торможений;
 - д — всех видов ядерного торможения.
2. Какое сечение соответствует параметрам операции ионного легирования Tilt=45°, Rotation= - 90°, Cutline (0, 0, 0, 1) ?



3. В модели связанной диффузии предполагается участие в диффузионном процессе следующих составляющих:
 - а — междоузлий и атомов примеси в междоузельном состоянии;
 - б — атомов примеси в замещающем состоянии, междоузлий, вакансий;
 - в — вакансий и междоузлий;
 - г — вакансий, междоузлий, атомов примеси в замещающем и междоузельном состоянии;
4. В модели связанной диффузии используются допущения:
 - а — атом примеси в замещающем состоянии может образовывать комплексы только с одним типом дефектов;
 - б — реакции ионизации являются неравновесными;
 - в — реакции ионизации являются равновесными, зарядовые состояния изменяются в диапазоне от -2 до +2;
 - г — комплексы разных типов не взаимодействуют друг с другом;
 - д — реакции ионизации являются неравновесными, зарядовые состояния изменяются в диапазоне от -1 до +1.
5. К возможным проявлениям TED-эффекта относится:

- а — взаимное влияние примесей в процессе диффузии;
- б — уменьшение глубины мелкозалегающих р-п переходов при увеличении температуры отжига;
- в — рекристаллизация слоев аморфизированного кремния;
- г — сегрегация примеси на границе кремний/SiO₂;
- д — формирование преципитатов.

6. Взаимодействие примесей в процессе диффузии приводит к следующим эффектам:

- а — присутствие бора замедляет диффузию фосфора и не влияет на диффузию мышьяка;
- б — диффузия бора замедляется в хвосте распределения фосфора и ускоряется в хвосте распределения мышьяка;
- в — присутствие мышьяка ускоряет диффузию бора и не влияет на диффузию фосфора;
- г — донорные примеси при совместной диффузии диффундируют быстрее, но не влияют на диффузию мышьяка;
- д — диффузия бора ускоряется в хвосте распределения фосфора и замедляется в хвосте распределения мышьяка.

7.2.4 Примерный перечень вопросов для подготовки к зачету

Не предусмотрено учебным планом

7.2.5 Примерный перечень вопросов для подготовки к экзамену

1. В чем заключаются преимущества от использования моделирования в проектировании интегральных схем?
2. Как можно классифицировать типы моделей технологических операций?
3. По каким признакам можно различить физические и геометрические модели?
4. Приведите примеры моделей различного типа.
5. Что такое функциональный состав модели операции?
6. Перечислите возможные виды изменений, происходящих в структуре при выполнении технологической операции.
7. Приведите примеры моделей операций, различающихся по функциональному составу
8. Опишите основные механизмы торможения ионов при ионной имплантации.
9. Что такое тормозная способность?
10. Как выглядит на графике энергетическая зависимость электронного и ядерного торможения?
11. Как в теории ЛШШ определяется величина ядерной тормозной способности?
12. Как зависит от энергии иона электронная тормозная способность?
13. Чему равна полная средняя длина пробега иона в мишени?
14. Как рассчитывается проекция пробега иона в диффузионной модели Бирсака?

15. Какой механизм определяет торможение ионов при каналировании?
16. Что такое критический угол каналирования?
17. Почему при проведении ионной имплантации подложку обычно поворачивают на 7° относительно направления ионного пучка?
18. Что означает принцип суперпозиции применительно к моделированию ионной имплантации?
19. Как осуществляется процесс моделирования ионной имплантации при использовании метода Монте-Карло?
20. Запишите основные уравнения для процесса диффузии в присутствии электрического поля.
21. Что такое TED – эффект?
22. Поясните вклад процесса кластеризации междоузлий в характеристики TED – эффекта.
23. Какие допущения используются при моделировании диффузии в поликристаллическом кремнии?
24. Какие допущения лежат в основе модели Дила–Гроува?
25. От чего зависят константы линейного и параболического роста окисла?
26. Перечислите основные процессы, учитываемые при численном моделировании окисления.
27. Дайте сравнительную характеристику модели Дила–Гроува и модели Массуда.
28. Запишите уравнение диффузии в присутствии движущихся границ.
29. Чем различаются с точки зрения моделирования процессы окисления и силицидизации?
30. Какие граничные условия устанавливаются при моделировании диффузии кремния в силициде?

7.2.6 Методика выставления оценки при проведении промежуточной аттестации

Экзамен проводится по билетам, каждый из которых содержит 2 теоретических вопроса и практическое задание. Каждый полный правильный ответ на теоретический вопрос оценивается до 2,0 баллов, практическое задание оценивается до 1,0 балла. Согласно полноте ответа балл может быть дробным. Максимальное количество набранных баллов – 5.

1. Оценка «Неудовлетворительно» ставится в случае, если студент набрал менее 2,75 баллов.
2. Оценка «Удовлетворительно» ставится в случае, если студент набрал от 2,76 до 3,75 баллов
3. Оценка «Хорошо» ставится в случае, если студент набрал от 3,76 до 4,75 баллов.
4. Оценка «Отлично» ставится, если студент набрал больше 4,75 балла.

7.2.7 Паспорт оценочных материалов

№ п/п	Контролируемые разделы (темы) дисциплины	Код контролируемой компетенции (или ее части)	Наименование оценочного средства
1	Понятие о математическом моделировании, моделях процессов и приборов.	ОПК-2, ОПК-7, ПКВ-1, ПКВ-4	Письменный ответ, устный опрос, проверка конспекта, защита лабораторных работ
2	Численные методы моделирования	ОПК-2, ОПК-7, ПКВ-1, ПКВ-4	Письменный ответ, устный опрос, проверка конспекта, защита лабораторных работ
3	Моделирование отдельных технологических операций	ОПК-2, ОПК-7, ПКВ-1, ПКВ-4	Письменный ответ, устный опрос, проверка конспекта, защита лабораторных работ
4	Математическое моделирование полупроводниковых приборов	ОПК-2, ОПК-7, ПКВ-1, ПКВ-4	Письменный ответ, устный опрос, проверка конспекта, защита лабораторных работ

7.3 Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности

Тестирование осуществляется, либо при помощи компьютерной системы тестирования, либо с использованием выданных тест-заданий на бумажном носителе. Время тестирования 30 мин. Затем осуществляется проверка теста экзаменатором и выставляется оценка согласно методике выставления оценки при проведении промежуточной аттестации.

Решение стандартных задач осуществляется, либо при помощи компьютерной системы тестирования, либо с использованием выданных задач на бумажном носителе. Время решения задач 30 мин. Затем осуществляется проверка решения задач экзаменатором и выставляется оценка, согласно методике выставления оценки при проведении промежуточной аттестации.

Решение прикладных задач осуществляется, либо при помощи компьютерной системы тестирования, либо с использованием выданных задач на бумажном носителе. Время решения задач 30 мин. Затем осуществляется проверка решения задач экзаменатором и выставляется оценка, согласно методике выставления оценки при проведении промежуточной аттестации.

Защита курсового проекта осуществляется согласно требованиям, предъявляемым к работе, описанным в методических материалах. Примерное время защиты на одного студента составляет 20 мин.

Ответ на письменный вопрос осуществляется на бумажном носителе. Студенту необходимо наиболее полно и структурировано изложить свои знания в письменном виде в рамках материала, представленного в лекциях, на лабораторных работах, в разделах литературы для самостоятельного обучения. Затем осуществляется проверка ответа экзаменатором и выставляется оценка,

согласно методике выставления оценки при проведении промежуточной аттестации. Время письменного ответа 30-45 минут.

Устный опрос осуществляется при личной беседе со студентом. Студенту предлагается без подготовки устно ответить на вопросы по теме курса. Оценивается полнота ответа и скорость ориентирования студента в материале курса. Оценка выставляется согласно методике выставления оценки при проведении промежуточной аттестации. Время устного ответа 5 минут.

8. УЧЕБНО МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

8.1 Перечень учебной литературы, необходимой для освоения дисциплины

Основная литература

1 Технология, конструкции и методы моделирования кремниевых интегральных микросхем [Текст] : учебное пособие : рекомендовано Учебно-методически объединением. Ч. 2 : Элементы и маршруты изготовления кремниевых ИС и методы их математического моделирования / под общ. ред. Ю. А. Чаплыгина. - Москва : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012 (Вологда : Произв. фирма "Полиграфист", 2009). - 422 с. : ил. - Библиогр.: с. 416-422 (68 назв.). - ISBN 978-5-94774-585-6 (Ч. 2). - ISBN 978-5-94774-583-2 : 308-88.

2 Петров, М.Н.

Моделирование компонентов и элементов в интегральных схемах : Учеб. пособие. - М. : Лань, 2011. - 464 с. : ил. - (Учебники для вузов. Специальная литература). - ISBN 978-5-8114-1075-0 : 1275-00.

3 Арсентьев А.В.

Математическое моделирование технологических процессов и интегральных схем [Электронный ресурс] : Лабораторный практикум: Учеб. пособие. - Электрон. текстовые, граф. дан. (5,5 Мб). - Воронеж : ФГБОУ ВО "Воронежский государственный технический университет", 2016. - 1 файл. - 30-00.

4 Петров, М.Н.

Моделирование компонентов и элементов интегральных схем [Электронный ресурс] : Учебник. - М. : Лань, 2011. - 464 с. - ISBN 978-5-8114-1075-0 : 398 p.

URL: http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=25&pl1_id=661

Дополнительная литература

5 Методические указания к выполнению лабораторных работ № 1-4 по дисциплине "Математическое моделирование технологических процессов и ИМС" для студентов направления 210100.62 "Электроника и наноэлектроника", профиля "Микроэлектроника и твердотельная электроника" очной формы обучения [Электронный ресурс] / Каф. полупроводниковой электроники и наноэлектроники; Сост.: А.В. Арсентьев, ассистент Е.Ю. Плотникова. - Электрон. текстовые, граф. дан. (2.14 Мб). - Воронеж : ФГБОУ ВПО "Воронежский государственный технический университет", 2013. - 1 файл. - 00-00.

6 Арсентьев, А.В.

Моделирование технологических процессов [Электронный ресурс] : Учеб. пособие. - Электрон. текстовые, граф. дан. (9,3 Мбайт). - Воронеж : ГОУВПО "Воронежский государственный технический университет", 2011. - 1 файл. - 30-00.

7 Бубенников, А.Н.

Моделирование интегральных микротехнологий, приборов и схем : Учеб. пособие для спец. "Физика и технология материалов и компонентов электронной техники". - Москва : Высш. шк., 1989. - 320 с. : ил. - 01-00.

8.2 Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине , включая перечень лицензионного программного обеспечения, ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», современных профессиональных баз данных и информационных справочных систем

Методические указания к выполнению лабораторных работ представлены на сайте: <http://cchgeu.ru/>

Системные программные средства: Microsoft Windows

Прикладные программные средства: Инструменты Microsoft DreamSpark, FireFox, симулятор SUPREM

9. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ БАЗА, НЕОБХОДИМАЯ ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА

9.1 Специализированная лекционная аудитория, оснащенная оборудованием для лекционных демонстраций и проекционной аппаратурой

9.2 Оборудование компьютерного класса (аудитории 209/4) для проведения лабораторных работ.

10. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ

По дисциплине «Математическое моделирование технологических процессов и интегральных схем» читаются лекции, проводятся лабораторные занятия, выполняется курсовой проект.

Основой изучения дисциплины являются лекции, на которых излагаются наиболее существенные и трудные вопросы, а также вопросы, не нашедшие отражения в учебной литературе.

Практические занятия (при наличии) направлены на приобретение практических навыков расчета полупроводниковых структур. Занятия проводятся путем решения конкретных задач в аудитории.

Лабораторные работы выполняются на лабораторном оборудовании в соответствии с методиками, приведенными в указаниях к выполнению работ.

Большое значение по закреплению и совершенствованию знаний имеет самостоятельная работа студентов. Информацию о всех видах самостоятельной работы студенты получают на занятиях.

Методика выполнения курсового проекта изложена в методических указаниях. Выполнять этапы курсового проекта должны своевременно и в установленные сроки.

Контроль усвоения материала дисциплины производится проверкой курсового проекта, защитой курсового проекта.

Освоение дисциплины оценивается на экзамене.

Вид учебных занятий	Деятельность студента (особенности деятельности студента инвалида и лица с ОВЗ, при наличии таких обучающихся)
<i>Лекция</i>	<i>Написание конспекта лекций: кратко, схематично, последовательно фиксировать основные положения, выводы, формулировки, обобщения; пометать важные мысли, выделять ключевые слова, термины. Проверка терминов, понятий с помощью энциклопедий, словарей, справочников с выписыванием толкований в тетрадь. Обозначение вопросов, терминов, материала, которые вызывают трудности, поиск ответов в рекомендуемой литературе. Если самостоятельно не удастся разобраться в материале, необходимо сформулировать вопрос и задать преподавателю на лекции или на практическом занятии.</i>
<i>Лабораторная работа</i>	<i>Лабораторные работы позволяют научиться применять теоретические знания, полученные на лекции при решении конкретных задач. Чтобы наиболее рационально и полно использовать все возможности лабораторных для подготовки к ним необходимо: следует разобрать лекцию по соответствующей теме, ознакомиться с соответствующим разделом учебника, проработать дополнительную литературу и источники, решить задачи и выполнить другие письменные задания.</i>
<i>Самостоятельная работа</i>	<i>Самостоятельная работа студентов способствует глубокому усвоению учебного материала и развитию навыков самообразования. Самостоятельная работа предполагает следующие составляющие:</i> <i>- работа с текстами: учебниками, справочниками, дополнительной литературой, а также проработка конспектов лекций;</i> <i>- выполнение домашних заданий и расчетов;</i> <i>- работа над темами для самостоятельного изучения;</i> <i>- участие в работе студенческих научных конференций, олимпиад;</i> <i>- подготовка к промежуточной аттестации.</i>
<i>Практические занятия</i>	<i>Конспектирование рекомендуемых источников. Работа с конспектом лекций, подготовка ответов к контрольным вопросам, просмотр рекомендуемой литературы. Прослушивание аудио- и видеозаписей по заданной теме, выполнение расчетно-графических заданий, решение задач по алгоритму.</i>
<i>Подготовка к промежуточной аттестации</i>	<i>Готовиться к промежуточной аттестации следует систематически, в течение всего семестра. Интенсивная подготовка должна начинаться не позднее, чем за месяц-полтора до промежуточной аттестации. Три дня перед промежуточной аттестацией эффективнее всего использовать для повторения и систематизации материала.</i>

ЛИСТ РЕГИСТРАЦИИ ИЗМЕНЕНИЙ

№ п/п	Перечень вносимых изменений	Дата внесения изменений	Подпись заведующего кафедрой, ответственной за реализацию ОПОП
1	Актуализирован раздел 8.2 в части состава используемого лицензионного программного обеспечения, современных профессиональных баз данных и справочных информационных систем	30.08.2018	
2	Актуализирован раздел 8.2 в части состава используемого лицензионного программного обеспечения, современных профессиональных баз данных и справочных информационных систем	31.08.2019	
3	Актуализирован раздел 8.2 в части состава используемого лицензионного программного обеспечения, современных профессиональных баз данных и справочных информационных систем	31.08.2020	