


**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

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



УТВЕРЖДАЮ

Декан факультета радиотехники  
и электроники

 / В.А. Небольсин /  
31 августа 2021 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 / 4 года и 11 мес.


Форма обучения очная / заочная

Год начала подготовки 2018

Автор программы

 \_\_\_\_\_ А.В. Арсентьев

И.о. заведующего кафедрой  
полупроводниковой электроники  
и наноэлектроники

 \_\_\_\_\_ А.В. Строгонов

Руководитель ОПОП

 \_\_\_\_\_ А.В. Арсентьев

Воронеж 2021

## 1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ

**1.1. Цели 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 Б1.В.02 «Математическое моделирование технологических процессов и интегральных схем» относится к дисциплинам части блока Б1 учебного плана, формируемой участниками образовательных отношений.

## 3. ПЕРЕЧЕНЬ ПЛАНИРУЕМЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

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

**ПК-5:** способность владеть современными методами расчета и проектирования микроэлектронных приборов и устройств твердотельной электроники, способность к восприятию, разработке и критической оценке новых способов их проектирования;

**ПК-8:** способность разрабатывать модели исследуемых процессов, материалов, элементов, приборов, устройств твердотельной электроники и микроэлектронной техники.

Компетенция	Результаты обучения, характеризующие сформированность компетенции
ПК-5	<b>знать</b> о месте и роли ММ технологических процессов, полупроводниковых приборов и ИМС;
	<b>уметь</b> использовать основные ММ технологических процессов создания полупроводниковых структур, интегральных микросхем и дискретных полупроводниковых приборов;
	<b>владеть</b> навыками создания ММ для конкретных технологических процессов, полупроводниковых приборов и ИМС.

ПК-8	<b>знать</b> о границах применения моделей;
	<b>уметь</b> использовать основные ММ, необходимые для анализа физических процессов в полупроводниках, позволяющие осуществлять физико-технологическое моделирование полупроводниковых приборов и элементов ИМС;
	<b>владеть</b> навыками проведения исследования ММ с помощью средств вычислительной техники.

#### 4. ОБЪЕМ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

Общая трудоемкость дисциплины «Математическое моделирование технологических процессов и интегральных схем» составляет 5 зачетных единиц.

Распределение трудоемкости дисциплины по видам занятий

##### Очная форма обучения

Вид учебной работы	Всего часов	Семестры
		8
<b>Аудиторные занятия (всего)</b>	48	48
В том числе:		
Лекции	24	24
Лабораторные работы (ЛР)	24	24
<b>Самостоятельная работа</b>	105	105
Курсовая работа	+	+
Часы на контроль	27	27
Вид промежуточной аттестации - экзамен	+	+
Общая трудоемкость	час	180
	зач. ед.	5

##### Заочная форма обучения

Вид учебной работы	Всего часов	Семестры
		9
<b>Аудиторные занятия (всего)</b>	24	24
В том числе:		
Лекции	12	12
Лабораторные работы (ЛР)	12	12
<b>Самостоятельная работа</b>	147	147
Курсовая работа	+	+
Часы на контроль	9	9
Вид промежуточной аттестации - экзамен	+	+
Общая трудоемкость	час	180
	зач. ед.	5

## 5. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

### 5.1 Содержание разделов дисциплины и распределение трудоемкости по видам занятий

#### очная форма обучения

№ п/п	Наименование темы	Содержание раздела	Лекц	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	-	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. Решение системы линейных алгебраических уравнений методом прогонки. Прямая прогонка, обратная прогонка. Пример. Реализация алгоритма на языке программирования C++.	4	4	22	30
3	Моделирование отдельных технологических операций	Математическое описание диффузии примесей. Диффузия легирующих примесей. Общие уравнения. Модель диффузии Ферми. Модель сегрегации примесей. Модель диффузии связанных пар примесь-дефект. Численные методы расчетов диффузионных моделей. Явный метод Эйлера, анализ устойчивости. Неявный метод Эйлера, анализ устойчивости. Модели ионной имплантации. Аналитические модели имплантации. Гауссово распределение ионно-имплантированных примесей. Распределение имплантации методом Монте-Карло. 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. Моделирование эпитаксии. Перераспределение примеси на границе при эпитаксии. Моделирование осаждения.	8	10	40	58
4	Математическое моделирование полупроводниковых приборов	САПР Tcad. Стандарт SUPREM. Обязательные команды и синтаксис. Настройка режимов расчета токов и напряжений. Вывод результатов моделирования. Разрезы структуры, графики токов и напряжений.	10	10	31	51
<b>Всего</b>			<b>24</b>	<b>24</b>	<b>105</b>	<b>153</b>
<b>Контроль</b>						<b>27</b>
<b>Итого</b>						<b>180</b>

#### заочная форма обучения

№ п/п	Наименование темы	Содержание раздела	Лекц	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	2	14	18
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. Решение системы линейных алгебраических уравнений методом прогонки. Прямая прогонка, обратная прогонка. Пример. Реализация алгоритма на языке программирования C++.	4	4	28	36

3	Моделирование отдельных технологических операций	Математическое описание диффузии примесей. Диффузия легирующих примесей. Общие уравнения. Модель диффузии Ферми. Модель сегрегации примесей. Модель диффузии связанных пар примесь-дефект. Численные методы расчетов диффузионных моделей. Явный метод Эйлера, анализ устойчивости. Неявный метод Эйлера, анализ устойчивости. Модели ионной имплантации. Аналитические модели имплантации. Гауссово распределение ионно-имплантированных примесей. Распределение Пирсона ионно-имплантированных примесей. Моделирование имплантации методом Монте-Карло. 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. Моделирование эпитаксии. Перераспределение примеси на границе при эпитаксии. Моделирование осаждения.	6	6	58	70
4	Математическое моделирование полупроводниковых приборов	САПР Tcad. Стандарт SUPREM. Обязательные команды и синтаксис. Настройка режимов расчета токов и напряжений. Вывод результатов моделирования. Разрезы структуры, графики токов и напряжений.	-	-	47	47
<b>Всего</b>			<b>12</b>	<b>12</b>	<b>147</b>	<b>171</b>
<b>Контроль</b>						<b>9</b>
<b>Итого</b>						<b>180</b>

## 5.2 Перечень лабораторных работ

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

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

В соответствии с учебным планом освоение дисциплины «Математическое моделирование технологических процессов и интегральных схем» предусматривает выполнение курсовой работы в 8 семестре для очной формы обучения, в 9 семестре для заочной формы обучения.

Примерная тематика курсовой работы: «Разработка технологического маршрута изготовления полупроводникового прибора по вариантам».

Задачи, решаемые при выполнении курсового проекта:

- разработать технологический маршрут изготовления полупроводникового прибора;
- сформировать структуру полупроводникового прибора;
- задать режим моделирования электрических характеристик.

Курсовая работа включает в себя графическую часть и расчетно-пояснительную записку.

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

## **7. ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)**

### **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».

<b>Компетенция</b>	<b>Результаты обучения, характеризующие сформированность компетенции</b>	<b>Критерии оценивания</b>	<b>Аттестован</b>	<b>Не аттестован</b>
ПК-5	<b>знать</b> о месте и роли ММ технологических процессов, полупроводниковых приборов и ИМС;	Выполнение и защита лабораторных работ	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах
	<b>уметь</b> использовать основные ММ технологических процессов создания полупроводниковых структур, интегральных микросхем и дискретных полупроводниковых приборов;	Выполнение и защита лабораторных работ	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах
	<b>владеть</b> навыками создания ММ для конкретных технологических процессов, полупроводниковых приборов и ИМС.	Выполнение и защита лабораторных работ	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах
ПК-8	<b>знать</b> о границах применения моделей;	Выполнение и защита лабораторных работ	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах
	<b>уметь</b> использовать основные ММ, необходимые для анализа физических процессов в полупроводниках, позволяющие осуществлять физико-технологическое моделирование полупроводниковых приборов и элементов ИМС;	Выполнение и защита лабораторных работ	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах
	<b>владеть</b> навыками проведения исследования ММ с помощью средств вычислительной техники.	Выполнение и защита лабораторных работ	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, в 9 семестре для заочной формы обучения по четырехбалльной системе:

- «отлично»;
- «хорошо»;
- «удовлетворительно»;
- «неудовлетворительно»

Компетенция	Результаты обучения, характеризующие сформированность компетенции	Критерии оценивания	Отлично	Хорошо	Удовл	Неудовл
ПК-5	знать о месте и роли ММ технологических процессов, полупроводниковых приборов и ИМС;	Тест	Выполнение теста на 90 – 100 %	Выполнение теста на 80 – 90 %	Выполнение теста на 70 – 80 %	В тесте менее 70 % правильных ответов
	уметь использовать основные ММ технологических процессов создания полупроводниковых структур, интегральных микросхем и дискретных полупроводниковых приборов;	Решение стандартных практических задач	Задачи решены в полном объеме и получены верные ответы	Продемонстрирован верный ход решения всех, но не получен верный ответ во всех задачах	Продемонстрирован верный ход решения в большинстве задач	Задачи не решены
	владеть навыками создания ММ для конкретных технологических процессов, полупроводниковых приборов и ИМС.	Решение прикладных задач в конкретной предметной области	Задачи решены в полном объеме и получены верные ответы	Продемонстрирован верный ход решения всех, но не получен верный ответ во всех задачах	Продемонстрирован верный ход решения в большинстве задач	Задачи не решены
ПК-8	знать о границах применения моделей;	Тест	Выполнение теста на 90 – 100 %	Выполнение теста на 80 – 90 %	Выполнение теста на 70 – 80 %	В тесте менее 70 % правильных ответов
	уметь использовать основные ММ, необходимые для анализа физических процессов в полупроводниках, позволяющие осуществлять физико-технологическое моделирование полупроводниковых приборов и элементов ИМС;	Решение стандартных практических задач	Задачи решены в полном объеме и получены верные ответы	Продемонстрирован верный ход решения всех, но не получен верный ответ во всех задачах	Продемонстрирован верный ход решения в большинстве задач	Задачи не решены
	владеть навыками проведения исследования ММ с помощью средств вычислительной техники.	Решение прикладных задач в конкретной предметной области	Задачи решены в полном объеме и получены верные ответы	Продемонстрирован верный ход решения всех, но не получен верный ответ во всех задачах	Продемонстрирован верный ход решения в большинстве задач	Задачи не решены

**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:

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;
2. прагматических;
3. познавательных;
4. символических.

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 находятся в некотором отношении между собой, 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

Решить задачу Коши методом Эйлера, модифицированным методом Эйлера и методом Рунге-Кутты, на заданном отрезке:

1	$y' = 7 - xy$	$y(-2) = 0$	$x \in [-2;0] \quad h = 0,5$
2	$y' = 2x + y$	$y(2) = 2$	$x \in [-2;0] \quad h = 0,5$
3	$y' = 5 + x - y$	$y(2) = 1$	$x \in [2;4] \quad h = 0,5$
4	$y' = y + 5x - 1$	$y(0) = 2$	$x \in [0;3,2] \quad h = 0,8$
5	$y' = y - 5x + 1$	$y(0) = 2$	$x \in [0;3,2] \quad h = 0,8$
6	$y' = 1 - x + y$	$y(0) = 1$	$x \in [0;2,5] \quad h = 0,5$
7	$y' = y - 5x$	$y(-1) = 1$	$x \in [-1;1] \quad h = 0,4$
8	$y' = x + 2y$	$y(0) = -1$	$x \in [0;2] \quad h = 0,4$
9	$y' = x + y + 2$	$y(1) = 1$	$x \in [1;3] \quad h = 0,5$
10	$y' = 3x + 4y$	$y(2) = 1$	$x \in [2;5] \quad h = 0,5$

### 7.2.3 Примерный перечень заданий для решения прикладных задач

Используя метод конечных разностей, найти решение краевой задачи с шагом  $h = 0,1$ :

1	$y'' + y'/x + 2y = x$	$y'(0,7) = 0,5$	$y'(1) = 1,2$
2	$y'' - xy' + 2y = x + 1$	$y'(0,9) = 2$	$y'(1,2) = 1$
3	$y'' + xy' + y = x + 1$	$y'(0,5) = 1$	$y'(0,8) = 1,2$
4	$y'' + 2y' - y/x = 3$	$y'(0,2) = 2$	$y'(0,5) = 1$
5	$y'' + 1,5y' - xy = 0,5$	$y'(1,3) = 1$	$y'(1,6) = 3$
6	$y'' + 2xy' - y = 0,4$	$y'(0,3) = 1$	$y'(0,6) = 2$
7	$y'' - 0,5xy' + y = 2$	$y'(0,4) = 1,2$	$y'(0,7) = 1,4$
8	$y'' + 2y' - xy = x^2$	$y'(0,6) = 0,7$	$y'(0,9) = 1$
9	$y'' - 3y' + y/x = 1$	$y'(0,4) = 2$	$y'(0,7) = 0,7$
10	$y'' - 3y' - y/x = x + 1$	$y'(1,2) = 1$	$y'(1,5) = 0,5$

#### 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  $7^\circ$  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 Мас-суда.
28. Запишите уравнение диффузии в присутствии движущихся границ.
29. Чем различаются с точки зрения моделирования процессы окисления и силицидации?
30. Какие граничные условия устанавливаются при моделировании диффузии кремния в силициде?

### 7.2.6 Методика выставления оценки при проведении промежуточной аттестации

Экзамен проводится по тест-билетам, каждый из которых содержит 10 вопросов и задачу. Каждый правильный ответ на вопрос в тесте оценивается 1 баллом, задача оценивается в 10 баллов (5 баллов верное решение и 5 баллов за верный ответ). Максимальное количество набранных баллов – 20.

1. Оценка «Отлично» ставится, если студент набрал от 16 до 20 баллов.
2. Оценка «Хорошо» ставится в случае, если студент набрал от 11 до 15 баллов.
3. Оценка «Удовлетворительно» ставится в случае, если студент набрал от 6 до 10 баллов
4. Оценка «Неудовлетворительно» ставится в случае, если студент набрал менее 6 баллов.

При получении оценок «Отлично», «Хорошо» и «Удовлетворительно» требуемые в рабочей программе знания, умения, владения по соответствующим компетенциям на промежуточном этапе считаются достигнутыми.

### 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.	ПК-5, ОПК-8	Проверка конспекта
2	Численные методы моделирования	ПК-5, ОПК-8	Тест, защита лабораторных работ, проверка конспекта
3	Моделирование отдельных технологических операций	ПК-5, ОПК-8	Тест, защита лабораторных работ, проверка конспекта
4	Математическое моделирование полупроводниковых приборов	ПК-5, ОПК-8	Защита лабораторных работ, проверка конспекта

### 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 преподавателем 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 преподавателем 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 преподавателем и выставляется оценка, согласно методике выставления оценки при проведении промежуточной аттестации.

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

## **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:** учеб. пособие: рекомендовано УМО. Ч. 2: Элементы и маршруты изготовления кремниевых ИС и методы их математического моделирования / под общ. ред. Ю.А. Чаплыгина. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. - 422 с. - ISBN 978-5-94774-585-6 (Ч. 2). - ISBN 978-5-94774-583-2

2. **Петров М.Н.** Моделирование компонентов и элементов в интегральных схемах: учеб. пособие / М.Н. Петров, Г.В. Гудков. - М.:Лань, 2011. - 464 с. - (Учебники для вузов. Специальная литература). - ISBN 978-5-8114-1075-0.

3. **Петров М.Н.** Моделирование компонентов и элементов интегральных схем [Электронный ресурс]: учеб. пособие / М.Н. Петров, Г.В. Гудков. - 2-е изд., стер. – СПб.: Лань, 2021. - 464 с. - Книга из коллекции Лань - Инженерно-технические науки. - ISBN 978-5-8114-8371-6. URL: <https://e.lanbook.com/book/175507>

4. **Арсентьев А.В.** Моделирование технологических процессов [Электронный ресурс]: учеб. пособие / А.В. Арсентьев, А.В. Строгонов, Д.С. Шацких. -Электрон. текстовые, граф. дан. (9,3 Мб). -Воронеж : ГОУВПО «Воронежский государственный технический университет»,2011.

5. **Самарский А.А.** Математическое моделирование [Электронный ресурс] / А.А. Самарский, А.П. Михайлов. – М.: Физматлит, 2005. - 160 с. - ISBN 978-5-9221-0120-2. URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=68976>

#### Дополнительная литература

6. **Абрамов И.И.** Моделирование физических процессов в элементах кремниевых интегральных микросхем / И. И. Абрамов. – Мн.: БГУ, 1999. - 189 с. - ISBN 985-445-148-8

7. **Бордаков Е.В.** Математическое моделирование технологических процессов, полупроводниковых приборов и элементов интегральных схем: конспект лекций / Е.В. Бордаков, А.И. Прокопьев; ВГТУ. - Воронеж: ГОУВПО «Воронежский государственный технический университет», 1996. - 53 с.

8. **Бубенников А.Н.** Моделирование интегральных микротехнологий, приборов и схем: учеб. пособие для спец. «Физика и технология материалов и компонентов электронной техники». – М.: Высш. шк., 1989. - 320 с.

9. **Мулярчик С.Г.** Численное моделирование микроэлектронных структур / С.Г. Мулярчик. – Мн.: Университетское, 1989. - 368 с. - ISBN 5-7855-0045-0

10. **Плотникова Е.Ю.** Моделирование технологических процессов и интегральных микросхем: лабораторный практикум / Е.Ю. Плотникова, А.В. Арсентьев, А.А. Винокуров. - ФГБОУ ВО «Воронеж. гос. техн. ун-т». - Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2020. - 95 с. - ISBN 978-5-7731-0866-5

11. **Арсентьев А.В.** Математическое моделирование технологических процессов и интегральных схем [Электронный ресурс]: лабораторный практикум: учеб. пособие / А.В. Арсентьев, Е.Ю. Плотникова. – Электрон. текстовые, граф. дан. (2,3 Мб). – Воронеж: ФГБОУ ВО «ВГТУ», 2016. – 138 с.

12. **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, Е.Ю. Плотникова. - Электрон. текстовые, граф. дан. (2.14 Мб). - Воронеж: ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2013. (№ 298-2013)**

13. ГОСТ 2.105-2019. ЕСКД. Общие требования к текстовым документам. – М.: ФГУП «Стандартинформ», 2019. – 35 с.

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

### **Программное обеспечение компьютеров для самостоятельной и аудиторной работы:**

- Операционные системы семейства MSWindows;
- Пакет офисных программ LibreOffice;
- Программа просмотра файлов WinDjview;
- Программа просмотра файлов формата pdf Adobe Acrobat Reader;
- Интернет-браузеры Mozilla Firefox, Google Chrome;
- Математический пакет MathCad Express, Smath Studio;
- Среда разработки Python;
- Система управления курсами Moodle;

### **Используемые электронные библиотечные системы:**

- Модуль книгообеспеченности АИБС «МАРК SQL»:  
<http://bibl.cchgeu.ru/provision/struct/>;
- Университетская библиотека онлайн: <http://biblioclub.ru/>;
- ЭБС Издательства «ЛАНЬ», в том числе к коллекциям «Инженерно-технические науки», «Физика»: <http://e.lanbook.com/>;
- ЭБС IPRbooks: <http://www.iprbookshop.ru/>;
- научная электронная библиотека eLIBRARY.RU: <http://elibrary.ru/>.

### **Информационные справочные системы:**

- портал федеральных государственных образовательных стандартов высшего образования: <http://fgosvo.ru>;
- единое окно доступа к образовательным ресурсам: <http://window.edu.ru/>;
- открытый образовательный ресурс НИЯУ МИФИ: <http://online.mephi.ru/>;
- открытое образование: <https://openedu.ru/>;
- физический информационный портал: <http://phys-portal.ru/index.html>
- Профессиональные справочные системы «Техэксперт»: <https://cntd.ru>
- Электронная информационная образовательная среда ВГТУ: <https://old.education.cchgeu.ru>

## **9 МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ БАЗА, НЕОБХОДИМАЯ ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА**

**1. Лекционная аудитория** 311/4, укомплектованная специализированной мебелью и оснащенная оборудованием для лекционных демонстраций: мультимедиа-проектором, стационарным экраном, наборами демонстрационного оборудования (учебный корпус № 4, расположенный по адресу: Московский пр., 179):

комплект учебной мебели: рабочее место преподавателя (стол, стул);  
рабочие места обучающихся (столы, стулья) на 22 человека.  
проектор BenQ MP515 DLP;  
экран ScreenMedia настенный.  
огнетушитель.

**2. Дисплейный класс** для проведения лабораторных занятий и самостоятельной работы студентов, укомплектованный специализированной мебелью и оснащенный персональными компьютерами с лицензионным программным обеспечением с возможностью подключения к сети «Интернет» и доступом в электронную информационно-образовательную среду университета, ауд. 209/4 (учебный корпус № 4, расположенный по адресу: Московский пр., 179), оснащенный необходимым оборудованием:

комплект учебной мебели: рабочее место преподавателя (стол, стул);  
рабочие места обучающихся (столы, стулья) на 20 человек.  
компьютер-сборка каф.9;  
компьютер в составе: (Н61/IntelCorei3/Кв/М/20" LCD);  
компьютер-сборка каф.7;  
компьютер-сборка каф.3;  
компьютер в составе: (Н61/IntelCorei3/Кв/М/23" LCD);  
компьютер-сборка каф.5;  
компьютер-сборка каф.4;  
компьютер-сборка каф.8;  
компьютер-сборка каф.2;  
компьютер-сборка каф.6;  
компьютер-сборка каф.10;  
комп. в сост: Сист.блок RAMEC GALE,монитор 17" LCD;  
компьютер-сборка каф.1;  
экран Projecta ProScreen настенный рулонный;  
проектор BenQ MP515 DLP;  
огнетушитель.

## **10 МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)**

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

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

Лабораторные работы выполняются на персональных компьютерах в соответствии с методиками, приведенными в указаниях к выполнению работ.

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

Методика выполнения курсовой работы изложена в учебно-методическом пособии. Выполнять этапы курсовой работы студенты должны своевременно и в установленные сроки.


Контроль усвоения материала дисциплины осуществляется тестированием и защитой курсового проекта. Освоение дисциплины оценивается на экзамене.

Вид учебных занятий	Деятельность студента
Лекция	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.
Лабораторная работа	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: разобрать лекцию по соответствующей теме, ознакомиться с соответствующим разделом учебника, проработать дополнительную литературу.
Самостоятельная работа	Самостоятельная работа студентов способствует глубокому усвоению учебного материала и развитию навыков самообразования. Самостоятельная работа предполагает следующие составляющие: - работа с текстами: учебниками, справочниками, дополнительной литературой, а также проработка конспектов лекций; - работа над темами для самостоятельного изучения; - участие в работе студенческих научных конференций, олимпиад; - подготовка к промежуточной аттестации.
Курсовая работа	При выполнении курсовой работы студенты должны научиться правильно и творчески использовать знания, полученные ими на лекциях и лабораторных занятиях. Задачи, решаемые при выполнении курсовой работы:

	<ul style="list-style-type: none"> <li>- осуществить поиск необходимой информации по теме работы;</li> <li>- систематизировать найденную информацию;</li> <li>- осуществить обзор литературных источников по заданной теме;</li> <li>- выработать умения решать прикладные задачи</li> </ul>
Подготовка к промежуточной аттестации	<p>Готовиться к промежуточной аттестации следует систематически, в течение всего семестра. Интенсивная подготовка должна начаться не позднее, чем за месяц-полтора до промежуточной аттестации. Данные перед экзаменом три дня эффективнее всего использовать для повторения и систематизации материала.</p>



## ЛИСТ РЕГИСТРАЦИИ ИЗМЕНЕНИЙ

№ п/п	Перечень вносимых изменений	Дата внесения изменений	Подпись заведующего кафедрой, ответственной за реализацию ОПОП
1	Актуализирован раздел 8.2: при осуществлении образовательного процесса по дисциплине используется образовательный портал ВГТУ – <a href="https://old.education.cchgeu.ru">https://old.education.cchgeu.ru</a>	31.08.2021	
2			
3			
4			