



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«Дальневосточный федеральный университет»**  
(ДФУ)

**ШКОЛА ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК**

«СОГЛАСОВАНО»  
Руководитель ОП

Саранин А.А.  
(подпись) (Ф.И.О. рук.ОП)  
« 19 » сентября 2018 г.

«УТВЕРЖДАЮ»  
Заведующий кафедрой  
физики низкоразмерных структур  
(название кафедры)

Саранин А.А.  
(подпись) (Ф.И.О. зав. каф.)  
« 19 » сентября 2018 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**

Методы математического моделирования

**Направление подготовки 11.04.04 «Электроника и нанoeлектроника»**

магистерская программа "Нанотехнологии в электронике"

**Форма подготовки очная**

курс  2  семестр  3   
лекции  0  час.  
практические занятия  32  час.  
лабораторные работы  36  час.  
в том числе с использованием МАО лек.   /пр.   /лаб.   час.  
в том числе в электронной форме лек.   /пр.   /лаб.   час.  
всего часов аудиторной нагрузки  68  час.  
в том числе с использованием МАО   час.  
в том числе контролируемая самостоятельная работа   час.  
в том числе в электронной форме   час.  
самостоятельная работа  76  час.  
в том числе на подготовку к экзамену   час.  
курсовой проект – не предусмотрено учебным планом  
зачет с оценкой  3  семестр  
экзамен – не предусмотрено учебным планом

Рабочая программа составлена в соответствии с требованиями образовательного стандарта высшего образования, самостоятельно устанавливаемого ДВФУ, утвержденного приказом ректора от 13.06.2017 № 12-13-1206.

Рабочая программа обсуждена на заседании кафедры  физики низкоразмерных структур , протокол №  1  от «  19  » сентября 2018 г.

Заведующий (ая) кафедрой  Саранин А.А.

Составитель (ли):  Колесников А.Г.

**Оборотная сторона титульного листа РПУД**

**I. Рабочая программа пересмотрена на заседании кафедры:**

Протокол от «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г. № \_\_\_\_\_

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_  
(подпись) (И.О. Фамилия)

**II. Рабочая программа пересмотрена на заседании кафедры:**

Протокол от «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г. № \_\_\_\_\_

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_  
(подпись) (И.О. Фамилия)

## ABSTRACT

**Master's degree in 11.04.04 Electronics and Nanoelectronics**

**Study profile “Nanotechnologies in Electronics”**

**Course title: Methods of mathematic modeling**

**Base part of Block 1, 4 credits**

**Instructor:**

A.G. Kolesnikov, Engineer of the Physics of low-dimensional structures department, School of Natural Sciences of Far Eastern Federal University.

**Learning outcomes:**

Specific Professional Competences

GPC-3, the ability to demonstrate teamwork skills, generate new ideas (creativity);

GPC-5, willingness to execute, submit, report and reasonably defend the results of the work performed;

SPC-5, the ability to make scientifically based conclusions by the re-sults of theoretical and experimental research, make recommendations on the improvement of devices and systems, prepare scientific publications and applications for inventions;

SPC-17, readiness to study scientific and technical information, native and foreign experience on the subject of research.

**Course description:** the study of mathematical models of physical processes occurring in semiconductor structures and devices; the study of semiconductor structures and devices as a simulation object; acquisition of practical skills in mathematical modeling and calculation of the characteristics of semiconductor structures and devices. Obtaining knowledge about the state and perspective directions of development of mathematical modeling methods.

**Main course literature:**

1. Filyak M.M. Basic physical processes in conductors, semiconductors and dielectrics [Electronic resource] : training manual / M.M. Filyak — Electron.

text data. — Orenburg: Orenburg State University, EBS ACV, 2015. — 134 p. — Access mode: <http://www.iprbookshop.ru/54132.html> – EBS «IPRbooks».

2. Krakhotkina E.V. Numerical methods in scientific calculations [Electronic resource] : Training manual. Course of lectures / E.V. Krahotkina. — Electron. text data. — Stavropol: North Caucasus Federal University, 2015. — 162 p. — Access mode: <http://www.iprbookshop.ru/62884.html> – EBS «IPRbooks».

3. Glazkov V.V. Firm programmable logic circuits Altera [Electronic resource] : training manual on the subject "Technology and circuit design of controls in technical systems" / V.V. Glazkov. — Electron. text data. — M. : Moscow State Technical University named after N.E. Bauman, 2014. — 136 p. — Access mode: <http://www.iprbookshop.ru/31617.html> – EBS «IPRbooks».

4. Electronics integrated circuits. Laboratory work and exercises [Electronic resource] : training manual / K.O. Petrosyants [et al.]. — Electron. text data. — M. : SOLON PRESS, 2017. — 556 p. — Access mode: <http://www.iprbookshop.ru/65723.html> – EBS «IPRbooks».

5. Mathematical models and methods of synthesis in ultra-large integrated circuits [Electronic resource] : laboratory workshop / N.I. Chervyakov [et al.]. — Electron. text data. — Stavropol: North Caucasus Federal University, 2016. — 187 p. — Access mode: <http://www.iprbookshop.ru/69399.html> – EBS «IPRbooks».

**Form of final knowledge control: pass.**

## АННОТАЦИЯ

Рабочая программа «Методы математического моделирования» предназначена для магистрантов 2 курса, обучающихся по программе подготовки 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника», общая трудоемкость освоения дисциплины составляет 4 зачетных единицы (144 часов). Дисциплина реализуется на 2 курсе, в 3 семестре.

Учебным планом предусмотрены лабораторные работы (36 час.), практические занятия (32 час.) и самостоятельная работа студента (76 час.). Дисциплина «Методы математического моделирования» входит в базовую часть, дисциплины профессионального цикла образовательной программы с кодом Б1.Б.02, реализуется на 2-м курсе, в 3-м семестре.

**Цель:** формирование фундаментальных знаний в области математического моделирования полупроводниковых приборов, элементов ИМС, технологических процессов изготовления полупроводниковых приборов и ИМС..

### **Задачи:**

- изучение математических моделей физических процессов, протекающих в полупроводниковых структурах и приборах.
- изучение полупроводниковых структур и приборов, как объекта моделирования.
- приобретение практических навыков по математическому моделированию и расчёту характеристик полупроводниковых структур и приборов.
- получение знаний о состоянии и перспективных направлениях развития методов математического моделирования.
- в процессе изучения дисциплины используются лекционные материалы, демонстрационные фотографии. При выполнении лабораторных работ для проведения расчетов используются ПК с учебной версией САПР TCAD.

Базой для освоения данной дисциплины являются курсы «Общая физика», «Физика твёрдого тела», «Физика полупроводников», «Высшая математика», «Численные методы». Курс «Общей физики» необходим для понимания природы явлений. В курсах «Физика твёрдого тела», «Физика полупроводников» рассматриваются свойства реальных объектов и процессов модели которых буду использоваться в данном курсе. «Высшая математика», «Численные методы» знакомит с основами применения математического аппарата для решения физических задач.

Изучаемый материал является базой для изучения последующих дисциплин практической направленности, в которых рассматривается исследование проводящих свойств полупроводников.

В результате изучения данной дисциплины у обучающихся формируются следующие общепрофессиональные и профессиональные компетенции (элементы компетенций).

<b>Код и формулировка компетенции</b>	<b>Этапы формирования компетенции</b>	
ОПК-3, способностью демонстрировать навыки работы в коллективе, порождать новые идеи (креативность)	Знает	теоретические основы физики полупроводников; основные разделы физики конденсированного состояния, для изучения полупроводниковых материалов; основные методы исследования полупроводниковых метериалов.
	Умеет	пользоваться теоретическими основами физики полупроводников для описания элементов интегральных микросхем; использовать основные способы решения научных и инновационных задач наноэлектроники для достижения конкретного результата.
	Владеет	навыками интерпретации результатов моделирования для описания и дополнения результатов экспериментального исследования; навыками практического использования основ физики полупроводников для исследования интегральных микросхем; способами и навыками, позволяющими определять

		перспективные направления наноэлектроники, в которых активно используются или могут использоваться полупроводниковые элементы.
ОПК-5, готовностью оформлять, представлять, докладывать и аргументированно защищать результаты выполненной работы	Знает	перспективные направления наноэлектроники в которых используются или могут использоваться полупроводниковых элементы; как самостоятельно найти нужную научную литературу, описывающую конкретное изучаемое явление.
	Умеет	применять теоретические знания для математического описания модели, соответствующей конкретному экспериментальному случаю; разбираться с научными данными стороннего эксперимента и делать соответствующие выводы.
	Владеет	навыками работы литературного поиска в сети «Интернет» и системах «Web of science» и «Scopus», работы с литературой, анализа сторонних научных данных.
ПК-5, способностью делать научно-обоснованные выводы по результатам теоретических и экспериментальных исследований, давать рекомендации по совершенствованию устройств и систем, готовить научные публикации и заявки на изобретения	Знает	основные принципы работы современных видов полупроводниковых элементов.
	Умеет	выбрать методику экспериментального исследования интегральных схем, в которых используются полупроводниковые элементны.
	Владеет	теоретическими основами полупроводниковой электроники; определять перспективные направления наноэлектроники, в которых используются или могут использоваться полупроводниковые элементы; навыками применения современных подходов для исследования полупроводниковых элементов.
ПК-17, готовностью осуществлять авторское сопровождение разрабатываемых устройств, приборов и системы	Знает	особенности технологического процесса приготовления полупроводниковых элементов, литографии и плазмохимического травления; основы для проведения самостоятельного численного моделирования технологических процессов полупроводниковой электронике.
	Умеет	выбрать необходимую систему материалов для создания и проектирования интегральных микросхем.

электронной техники на этапах проектирования и производства	Владеет	навыками проектирования технологического процесса производства простейших наноструктурных объектов для создания полупроводниковых элементов и микросхем, в которых эти элементы могут быть использованы
---	---------	---

## **I. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ПРАКТИЧЕСКОЙ ЧАСТИ КУРСА**

### **Практические занятия (32/ \_\_ час.)**

#### **Тема 1. Введение. Основные понятия математического моделирования (8 час.)**

- Общие сведения о математическом моделировании;
- Основные понятия математического моделирования;
- Фундаментальные законы природы;
- Простейшие математические модели, получаемые из фундаментальных законов природы;
- Методы математического моделирования.

#### **Тема 2. Основные принципы дискретного моделирования (6 час.)**

- Необходимость численного моделирования и элементарные понятия теории разностных схем;
- Непосредственная формальная аппроксимация;
- Интерполяционный метод;
- Построение разностных схем с помощью вариационных принципов;
- Использование иерархического подхода к получению дискретных моделей;
- Программа физико-технологического моделирования ISE TCAD 7.0.

#### **Тема 3. Математические модели технологических процессов изготовления полупроводниковых приборов и интегральных схем (6 час.)**

- Модели процессов ионного легирования;
- Модели диффузионных процессов;



- Модели термического окисления;
- Моделирование граничных процессов;
- Моделирование процесса эпитаксии.

#### **Тема 4. Математическое моделирование процессов, протекающих в полупроводниковых структурах (6 час.)**

- Основные уравнения полупроводника;
- Основные подходы к моделированию;
- Граничные условия в численном моделировании полупроводниковых структур;
- Модели электрофизических параметров для физико-топологического расчета полупроводниковых структур.

#### **Тема 5. Математическое моделирование полупроводниковых приборов и элементов интегральных схем (6 час.)**

- Модель диода;
- Модели биполярного транзистора;
- Модель полевого транзистора с управляющим р-п – переходом;
- Модель МДП-транзистора;
- Тенденции развития математического моделирования;
- Применение программы физико-технологического моделирования ISE TCAD 7.0 для расчёта полупроводниковых приборов и структур.

## Лабораторные работы (36/ \_\_ час.)

### Лабораторная работа №1. Решение фундаментальной системы уравнений полупроводника (4 / \_\_ час.)

*Цель лабораторной работы:*

1. Изучение основных принципов технологического моделирования.
2. Знакомство с учебной программой технологического моделирования.
3. Практическое освоение методов технологического моделирования на примере маршрута КМОП-транзисторов с проектными нормами 100 нм.

*По выполнении работы студенты должны знать:*

1. Маршрут формирования КМОП-транзисторов с проектными нормами 100 нм.
2. Модели технологических процессов используемые при моделировании маршрута формирования КМОП-транзисторов с проектными нормами 90 нм.
3. Особенности моделирования технологических процессов с проектными нормами 100 нм.

*Должны уметь:*

1. Создавать маршрут моделирования с соответствием задания.
2. Визуализировать результаты моделирования 1D и 2D структур.
3. Выбирать модели технологических процессов для формирования КМОП-транзисторов с проектными нормами 100 нм.

*Порядок выполнения работы*

1. Изучить описание работы, составить краткий конспект теоретической части.
2. Нарисовать эскиз 2D сечения n- и p-канальных МДП-транзисторов.
3. Получить допуск к работе.
4. Ознакомиться с интерфейсом программ SWB-Ligament и Sentaurus TCAD.
5. Сформировать параметризованный проект-маршрут моделирования процесса формирования наноразмерных n- и p-МОП-транзисторов в соответствии с вариантом задания (таблица 1)
6. Создать топологию исследуемой КМОП-структуры.
7. Вывести одномерные и двумерные сечения рассчитанной структуры.
8. Оформить отчет.

**Лабораторная работа №2. Моделирование технологических процессов при помощи программного модуля DIOS в САПР ISE TCAD (4 /\_\_ час.)**

*Цель лабораторной работы:*

1. Изучение принципов моделирования технологических процессов.
2. Знакомство с учебной программой технологического моделирования САПР ISE TCAD.
3. Практическое освоение методов технологического моделирования при помощи программного модуля DIOS.

*По выполнению работы студенты должны знать:*

1. Маршрут формирования КМОП-транзисторов с проектными нормами 90 нм.
2. Модели технологических процессов используемые при моделировании маршрута формирования КМОП-транзисторов с проектными нормами 90 нм.
3. Особенности моделирования технологических процессов с проектными нормами 90 нм.

*Должны уметь:*

1. Создавать модель полупроводниковой архитектуры с соответствием задания.
2. Обработать результаты моделирования технологических процессов двумерных архитектур.
3. Работать с использованием модуля DIOS для проведения симуляций технологических процессов с проектными нормами 100 нм.

*Порядок выполнения работы*

1. Изучить описание работы, составить краткий конспект теоретической части.
2. Нарисовать эскиз 2D сечения предлагаемой модели транзистора.
3. Получить допуск к работе.
4. Ознакомиться с интерфейсом программы САПР ISE TCAD.
5. Построить дерево экспериментов для выбранной технологической операции по заданию. Создать командные файлы для используемых программ.
6. Вывести одномерные и двумерные сечения рассчитанной структуры.
7. Определить толщину подзатворного оксида, глубины залегания рп-переходов, концентрацию примеси на границе раздела подзатворный оксид/кремний по середине затвора.
8. Оформить отчет.

### **Лабораторная работа №3. Моделирование физических процессов в полупроводниковых структурах при помощи программного модуля DESSIS в САПР ISE TCAD (4 / \_\_ час.)**

*Цель лабораторной работы:*

1. Изучение основных принципов технологического моделирования.
2. Работа в учебной программе технологического моделирования САПР ISE TCAD.
3. Практическое освоение методов технологического моделирования на примере маршрута КМОП-транзисторов с проектными нормами 90 нм.

*По выполнению работы студенты должны знать:*

1. Маршрут формирования КМОП-транзисторов с проектными нормами 90 нм.
2. Модели технологических процессов используемые при моделировании маршрута формирования КМОП-транзисторов с проектными нормами 90 нм.
3. Особенности моделирования технологических процессов с проектными нормами 90 нм.

*Должны уметь:*

1. Создавать маршрут моделирования с соответствием задания.
2. Визуализировать результаты моделирования 1D и 2D структур.
3. Выбирать модели технологических процессов для формирования КМОП-транзисторов с проектными нормами 90 нм.

*Порядок выполнения работы*

1. Изучить описание работы, составить краткий конспект теоретической части.
2. Нарисовать эскиз 2D сечения n- и p-канальных МДП-транзисторов.
3. Получить допуск к работе.
4. Ознакомиться с интерфейсом программы САПР ISE TCAD.
5. Построить дерево экспериментов для выбранной технологической операции по заданию. Создать командные файлы для используемых программ.
6. Промоделировать созданный проект.
7. Вывести одномерные и двумерные сечения рассчитанной структуры.
8. Провести анализ физических процессов в рассматриваемой полупроводниковой структуре.
9. Оформить отчет.

## **Лабораторная работа №4. Моделирование полупроводниковых структур при помощи программного модуля MDRAW в САПР ISE TCAD (4 / \_\_ час.)**

*Цель лабораторной работы:*

1. Изучение принципов моделирования технологических процессов.
2. Работа в учебной программе технологического моделирования САПР ISE TCAD.
3. Практическое освоение методов технологического моделирования при помощи программного модуля MDRAW.

*По выполнению работы студенты должны знать:*

1. Маршрут формирования КМОП-транзисторов с проектными нормами 90 нм.
2. Модели технологических процессов используемые при моделировании маршрута формирования КМОП-транзисторов с проектными нормами 90 нм.
3. Особенности моделирования технологических процессов с проектными нормами 90 нм.

*Должны уметь:*

1. Создавать модель полупроводниковой архитектуры с соответствием задания.
2. Обрабатывать результаты моделирования технологических процессов двухмерных архитектур.
3. Работать с использованием модуля MDRAW для проведения симуляций технологических процессов с проектными нормами 100 нм.

*Порядок выполнения работы*

1. Изучить описание работы, составить краткий конспект теоретической части.
2. Нарисовать эскиз 2D сечения предлагаемой модели транзистора.
3. Получить допуск к работе.
4. Ознакомиться с интерфейсом программы САПР ISE TCAD.
5. Построить дерево экспериментов для выбранной технологической операции по заданию. Создать командные файлы для используемых программ.
6. Вывести одномерные и двумерные сечения рассчитанной структуры.
7. Провести анализ полученных результатов. Ответить на вопросы.
8. Оформить отчет.

**Лабораторная работа №5. Моделирование физических процессов в полупроводниковых структурах при помощи программного модуля MDRAW в САПР ISE TCAD (4 / \_\_ час.)**

*Цель лабораторной работы:*

1. Изучение основных принципов технологического моделирования.
2. Работа в учебной программе технологического моделирования САПР ISE TCAD.
3. Практическое освоение методов технологического моделирования на примере маршрута КМОП-транзисторов с проектными нормами 90 нм.

*По выполнению работы студенты должны знать:*

1. Маршрут формирования КМОП-транзисторов с проектными нормами 90 нм.
2. Модели технологических процессов используемые при моделировании маршрута формирования КМОП-транзисторов с проектными нормами 90 нм.
3. Особенности моделирования технологических процессов с проектными нормами 90 нм.

*Должны уметь:*

1. Создавать маршрут моделирования с соответствием задания.
2. Визуализировать результаты моделирования 1D и 2D структур.
3. Выбирать модели технологических процессов для формирования КМОП-транзисторов с проектными нормами 90 нм.

*Порядок выполнения работы*

1. Изучить описание работы, составить краткий конспект теоретической части.
2. Нарисовать эскиз 2D сечения n- и p-канальных МДП-транзисторов.
3. Получить допуск к работе.
4. Ознакомиться с интерфейсом программы САПР ISE TCAD.
5. Построить дерево экспериментов для выбранной технологической операции по заданию. Создать командные файлы для используемых программ.
6. Промоделировать созданный проект.
7. Вывести одномерные и двумерные сечения рассчитанной структуры.
8. Проанализировать наблюдаемые физические процессы исходя из данных симуляций в модуле MDRAW.
9. Оформить отчет.

## **Лабораторная работа №6. Моделирование полупроводниковых структур при помощи программного модуля MDRAW в САПР ISE TCAD (4 / \_\_ час.)**

*Цель лабораторной работы:*

1. Изучение основных принципов технологического моделирования.
2. Работа в учебной программе технологического моделирования САПР ISE TCAD.
3. Практическое освоение методов технологического моделирования на примере маршрута КМОП-транзисторов с проектными нормами 90 нм.

*По выполнению работы студенты должны знать:*

1. Маршрут формирования КМОП-транзисторов с проектными нормами 90 нм.
2. Модели технологических процессов используемые при моделировании маршрута формирования КМОП-транзисторов с проектными нормами 90 нм.
3. Особенности моделирования технологических процессов с проектными нормами 90 нм.

*Должны уметь:*

1. Создавать маршрут моделирования с соответствием задания.
2. Визуализировать результаты моделирования 1D и 2D структур.
3. Выбирать модели технологических процессов для формирования КМОП-транзисторов с проектными нормами 90 нм.

*Порядок выполнения работы*

1. Изучить описание работы, составить краткий конспект теоретической части.
2. Нарисовать эскиз 2D предложенной полупроводниковой структуры.
3. Получить допуск к работе.
4. Ознакомиться с интерфейсом программы САПР ISE TCAD.
5. Построить дерево экспериментов для выбранной технологической операции по заданию. Создать командные файлы для используемых программ.
6. Промоделировать созданный проект.
7. Вывести одномерные и двумерные сечения рассчитанной структуры.
8. Проанализировать работу готовой полупроводниковой структуры исходя из данных симуляций в модуле MDRAW.
9. Оформить отчет.

**Лабораторная работа №7. Моделирование физических процессов в полупроводниковых структурах при помощи программного модуля TESPLOT в САПР ISE TCAD (4 / \_\_ час.)**

*Цель лабораторной работы:*

1. Изучение основных принципов технологического моделирования.
2. Работа в учебной программе технологического моделирования САПР ISE TCAD.
3. Практическое освоение методов технологического моделирования на примере маршрута КМОП-транзисторов с проектными нормами 90 нм.

*По выполнению работы студенты должны знать:*

1. Маршрут формирования КМОП-транзисторов с проектными нормами 90 нм.
2. Модели технологических процессов используемые при моделировании маршрута формирования КМОП-транзисторов с проектными нормами 90 нм.
3. Особенности моделирования технологических процессов с проектными нормами 90 нм.

*Должны уметь:*

1. Создавать маршрут моделирования с соответствием задания.
2. Визуализировать результаты моделирования 1D и 2D структур.
3. Выбирать модели технологических процессов для формирования КМОП-транзисторов с проектными нормами 90 нм.

*Порядок выполнения работы*

1. Изучить описание работы, составить краткий конспект теоретической части.
2. Нарисовать эскиз 2D сечения n- и p-канальных МДП-транзисторов.
3. Получить допуск к работе.
4. Ознакомиться с интерфейсом программы САПР ISE TCAD.
5. Построить дерево экспериментов для выбранной технологической операции по заданию. Создать командные файлы для используемых программ.
6. Промоделировать созданный проект.
7. Вывести одномерные и двумерные сечения рассчитанной структуры.
8. Проанализировать наблюдаемые физические процессы исходя из данных симуляций в модуле TESPLOT.
9. Оформить отчет.



## **Лабораторная работа №8. Моделирование полупроводниковых структур при помощи программного модуля TESPLOT в САПР ISE TCAD (4 / \_\_ час.)**

*Цель лабораторной работы:*

1. Изучение основных принципов технологического моделирования.
2. Работа в учебной программе технологического моделирования САПР ISE TCAD.
3. Практическое освоение методов технологического моделирования на примере маршрута КМОП-транзисторов с проектными нормами 90 нм.

*По выполнению работы студенты должны знать:*

1. Маршрут формирования КМОП-транзисторов с проектными нормами 90 нм.
2. Модели технологических процессов используемые при моделировании маршрута формирования КМОП-транзисторов с проектными нормами 90 нм.
3. Особенности моделирования технологических процессов с проектными нормами 90 нм.

*Должны уметь:*

1. Создавать маршрут моделирования с соответствием задания.
2. Визуализировать результаты моделирования 1D и 2D структур.
3. Выбирать модели технологических процессов для формирования КМОП-транзисторов с проектными нормами 90 нм.

*Порядок выполнения работы*

1. Изучить описание работы, составить краткий конспект теоретической части.
2. Нарисовать эскиз 2D сечения n- и p-канальных МДП-транзисторов.
3. Получить допуск к работе.
4. Ознакомиться с интерфейсом программы САПР ISE TCAD.
5. Построить дерево экспериментов для выбранной технологической операции по заданию. Создать командные файлы для используемых программ.
6. Промоделировать созданный проект.
7. Вывести одномерные и двумерные сечения рассчитанной структуры.
8. Проанализировать работу готовой полупроводниковой структуры исходя из данных симуляций в модуле TESPLOT.
9. Оформить отчет.

**Лабораторная работа №9. Математическое моделирование полупроводниковых приборов и элементов интегральных схем при помощи программных модулей DESSIS, MDRAW, TECPLOT в САПР ISE TCAD (4 / \_\_ час.) Цель лабораторной работы:**

1. Освоение комплекса методов и модулей для проведения симуляций полупроводниковых приборов и элементов интегральных схем.

2. Работа в учебной программе технологического моделирования САПР ISE TCAD.

3. Практическое освоение методов технологического моделирования на примере маршрута КМОП-транзисторов с проектными нормами 90 нм.

*По выполнению работы студенты должны знать:*

1. Маршрут формирования КМОП-транзисторов с проектными нормами 90 нм.

2. Модели технологических процессов используемые при моделировании маршрута формирования КМОП-транзисторов с проектными нормами 90 нм.

3. Особенности моделирования технологических процессов с проектными нормами 90 нм.

*Должны уметь:*

1. Создавать маршрут моделирования с соответствием задания.

2. Визуализировать результаты моделирования 1D и 2D структур.

3. Выбирать модели технологических процессов для формирования КМОП-транзисторов с проектными нормами 90 нм.

*Порядок выполнения работы*

1. Изучить описание работы, составить краткий конспект теоретической части.

2. Нарисовать эскиз 2D сечения n- и p-канальных МДП-транзисторов.

3. Получить допуск к работе.

4. Ознакомиться с интерфейсом программы САПР ISE TCAD.

5. Построить дерево экспериментов для выбранной технологической операции по заданию. Создать командные файлы для используемых программ.

6. Промоделировать созданный проект.

7. Вывести одномерные и двумерные сечения рассчитанной структуры.

8. Проанализировать работу готовой интегральной схемы исходя из данных симуляций с использованием модулей DESSIS, MDRAW, TECPLOT.

9. Оформить отчет.

## II. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ОБУЧАЮЩИХСЯ

Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся по дисциплине «Методы математического моделирования» представлено в Приложении 1 и включает в себя:

план-график выполнения самостоятельной работы по дисциплине, в том числе примерные нормы времени на выполнение по каждому заданию;

характеристика заданий для самостоятельной работы обучающихся и методические рекомендации по их выполнению;

требования к представлению и оформлению результатов самостоятельной работы;

критерии оценки выполнения самостоятельной работы.

## III. КОНТРОЛЬ ДОСТИЖЕНИЯ ЦЕЛЕЙ КУРСА

№ п/п	Контролируемые разделы / темы дисциплины	Коды и этапы формирования компетенций	Оценочные средства		
			текущий контроль	промежуточная аттестация	
1	Введение. Основные понятия математического моделирования	ОПК-3	знает	Конспект (ПР-7)	зачет, вопросы 1-7 Собеседование (УО-1)
			умеет	Собеседование (УО-1)	зачет, задание, тип 1 Собеседование (УО-1)
			владеет	Лабораторная работа (ПР-6)	зачет, задание, тип 1 Собеседование (УО-1)
2	Основные принципы дискретного моделирования	ОПК-3, ОПК-5	знает	Конспект (ПР-7)	зачет, вопросы 8-11 Собеседование (УО-1)
			умеет	Собеседование (УО-1)	зачет, задание, тип 2 Собеседование (УО-1)

			владеет	Лабораторная работа (ПР-6)	зачет, задание, тип 2 Собеседование (УО-1)
3	Математические модели технологических процессов изготовления полупроводниковых приборов и интегральных схем	ПК-5	знает	Конспект (ПР-7)	зачет, вопросы 12-13 Собеседование (УО-1)
			умеет	Собеседование (УО-1)	зачет, задание, тип 3 Собеседование (УО-1)
			владеет	Лабораторная работа (ПР-6)	зачет, задание, тип 3 Собеседование (УО-1)
4	Математическое моделирование процессов, протекающих в полупроводниковых структурах	ПК-17	знает	Конспект (ПР-7)	зачет, вопросы 14-15 Собеседование (УО-1)
			умеет	Собеседование (УО-1)	зачет, задание, тип 4 Собеседование (УО-1)
			владеет	Лабораторная работа (ПР-6)	зачет, задание, тип 4 Собеседование (УО-1)
5	Математическое моделирование полупроводниковых приборов и элементов интегральных схем	ОПК-3, ОПК-5, ПК-5, ПК-17	знает	Конспект (ПР-7)	зачет, вопросы 16-17 Собеседование (УО-1)
			умеет	Собеседование (УО-1)	зачет, задание, тип 5 Собеседование (УО-1)
			владеет	Лабораторная работа (ПР-6)	зачет, задание, тип 5 Собеседование (УО-1)

Типовые контрольные задания, методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений и навыков и (или) опыта

деятельности, а также критерии и показатели, необходимые для оценки знаний, умений, навыков и характеризующие этапы формирования компетенций в процессе освоения образовательной программы, представлены в Приложении 2.

## IV. СПИСОК УЧЕБНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ И ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

### Основная литература

(электронные и печатные издания)

1. Филяк М.М. Основные физические процессы в проводниках, полупроводниках и диэлектриках [Электронный ресурс] : учебное пособие / М.М. Филяк. — Электрон. текстовые данные. — Оренбург: Оренбургский государственный университет, ЭБС АСВ, 2015. — 134 с. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/54132.html> – ЭБС «IPRbooks».
2. Крахоткина Е.В. Численные методы в научных расчетах [Электронный ресурс] : учебное пособие. Курс лекций / Е.В. Крахоткина. — Электрон. текстовые данные. — Ставрополь: Северо-Кавказский федеральный университет, 2015. — 162 с. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/62884.html> – ЭБС «IPRbooks».
3. Глазков В.В. Программируемые логические интегральные схемы фирмы Altera [Электронный ресурс] : учебное пособие по дисциплине «Технология и схемотехника средств управления в технических системах» / В.В. Глазков. — Электрон. текстовые данные. — М. : Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, 2014. — 136 с. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/31617.html> – ЭБС «IPRbooks».
4. Электроника интегральных схем. Лабораторные работы и упражнения [Электронный ресурс] : учебное пособие / К.О. Петросянц [и др.]. — Электрон. текстовые данные. — М. : СОЛОН-ПРЕСС, 2017. — 556 с. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/65723.html> – ЭБС «IPRbooks».
5. Математические модели и методы синтеза в сверхбольших интегральных схемах [Электронный ресурс] : лабораторный практикум / Н.И. Червяков [и др.]. — Электрон. текстовые данные. — Ставрополь: Северо-Кавказский федеральный университет, 2016. — 187 с. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/69399.html> – ЭБС «IPRbooks».

### Дополнительная литература

(печатные и электронные издания)

1. Кудреватых Н.В. Магнетизм редкоземельных металлов и их интерметаллических соединений [Электронный ресурс] : учебное пособие / Н.В. Кудреватых, А.С. Волегов. — Электрон. текстовые данные. — Екатеринбург: Уральский федеральный университет, ЭБС АСВ, 2015. — 200 с. — 978-5-7996-1604-5. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/69622.html>
2. Астайкин А.И. Метрология и радиоизмерения [Электронный ресурс]: учебное пособие / Астайкин А.И., Помазков А.П., Щербак Ю.П. – Электрон.

текстовые данные. – Саров: Российский федеральный ядерный центр – ВНИИЭФ, 2010. – 405 с. – Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/18440.html> – ЭБС «IPRbooks».

3. Берлин Б.В. Получение тонких пленок реактивным магнетронным распылением [Электронный ресурс] / Б.В. Берлин, Л.А. Сейдман. — Электрон. текстовые данные. — М. : Техносфера, 2014. — 256 с. — 978-5-94836-369-1. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/31877.html>

4. Беркин А.Б. Физические основы вакуумной техники [Электронный ресурс] : учебное пособие / А.Б. Беркин, А.И. Василевский. — Электрон. текстовые данные. — Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2014. — 84 с. — 978-5-7782-2424-7. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/45189.html>

5. Юрчук С.Ю. Компьютерное моделирование нанотехнологий, наноматериалов и наноструктур. Моделирование наносистем методами молекулярной динамики [Электронный ресурс] : курс лекций / С.Ю. Юрчук. — Электрон. текстовые данные. — М. : Издательский Дом МИСиС, 2013. — 47 с. — 978-5-87623-663-0. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/56067.html>

6. Юрчук С.Ю. Компьютерное моделирование нанотехнологий, наноматериалов и наноструктур. Математическое моделирование фотолитографических процессов и процессов электронной литографии при создании субмикронных структур и структур с нанометровыми размерами [Электронный ресурс] : курс лекций / С.Ю. Юрчук. — Электрон. текстовые данные. — М. : Издательский Дом МИСиС, 2013. — 45 с. — 978-5-87623-662-3. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/56066.html>

### **Нормативно-правовые документы**

1. ГОСТ Р 57700.6-2017 Численное моделирование физических процессов. Термины и определения в области бессеточных методов численного моделирования.
2. ГОСТ 11630-84 Приборы полупроводниковые. Общие технические условия.
3. ГОСТ 15133-77 Приборы полупроводниковые. Термины и определения
4. ГОСТ 8.417-02 ГСИ. Единицы величин.
5. ГОСТ 18472-88 Приборы полупроводниковые. Основные размеры.

### **Перечень информационных технологий и программного обеспечения**

При осуществлении образовательного процесса по дисциплине может использоваться стандартное программное обеспечение компьютерных учебных классов (Windows, Microsoft Office).

## **V. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ**

В процессе обучения студент должен не только освоить учебную программу, но и приобрести навыки самостоятельной работы. Студент должен уметь планировать и выполнять свою работу. Удельный вес самостоятельной работы обычно составляет по времени 53% от всего времени изучаемого цикла. Это отражено в учебных планах и графиках учебного процесса, с которыми каждый студент может ознакомиться у преподавателя дисциплины или на кафедре.

Главное в период обучения своей специальности – это научиться методам самостоятельного умственного труда, сознательно развивать свои творческие способности и овладевать навыками творческой работы. Для этого необходимо строго соблюдать дисциплину учебы и поведения.

Каждому студенту следует составлять еженедельный и семестровый планы работы, а также план на каждый рабочий день. С вечера всегда надо распределять работу на следующий день. В конце каждого дня целесообразно подводить итог работы: тщательно проверить, все ли выполнено по намеченному плану, не было ли каких-либо отступлений, а если были, по какой причине это произошло. Нужно осуществлять самоконтроль, который является необходимым условием как успешной учебы, так и последующей работы. Если что-то осталось невыполненным, необходимо изыскать время для завершения этой части работы, не уменьшая объема недельного плана.

Организация деятельности студента.

*Практическое занятие.* Перед выполнением практических работ студенты должны ознакомиться с теоретическим материалом по теме занятия. Если при изучении теоретического материала возникли вопросы, задать вопрос преподавателю.

*Лабораторная работа.* Перед выполнением лабораторных работ студенты должны ознакомиться с теоретическим материалом по текущей



теме. Если при изучении данного материала возникли вопросы, проконсультироваться с преподавателем. Прочитать инструкцию по выполнению лабораторной работы. Составить план выполнения для достижения поставленных задач. В случае затруднений необходимо обратиться к преподавателю. Следуя составленному плану, начать выполнение лабораторной работы. После выполнения каждого этапа, необходимо сделать анализ полученных результатов. Если результат удовлетворяет всем требованиям, указанным в задании, перейти к следующему этапу. В противном случае, если результат не удовлетворяет требованиям задания, приводит к некорректным выводам и/или ответам, необходимо проанализировать причины, приведшие к ошибкам. Работа над ошибками является одним из условий процесса совершенствования знаний и навыков а, следовательно, успешной учебы и работы.

После выполнения всех этапов лабораторной работы нужно составить отчет о проделанной работе. Представить данный отчет на проверку преподавателю.

*Самостоятельная работа.* Выполнение самостоятельной работы студентами необходимо для успешного закрепления изученного материала и навыков моделирования, приобретенных на лабораторных работах. Процесс выполнения схож с лабораторными работами, с одним отличием – отсутствует возможность текущей консультации с преподавателем по возникающим ошибкам, либо трудностям. Благодаря этому студент начинает приобретать навыки самостоятельного анализа и решения проблем, что позволяет лучше усвоить материал. Перед выполнением самостоятельной работы прочитать поставленное задание и составить план действий для его выполнения. Следуя составленному плану, начать выполнение самостоятельной работы. Анализ полученных результатов, необходим после выполнения каждого этапа. Если результат удовлетворяет всем требованиям, указанным в задании, перейти к следующему этапу. После выполнения всех этапов самостоятельной работы нужно оформить результаты в виде отчета.

Представить данный отчет на проверку преподавателю на лабораторном занятии.

## VI. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Для проведения исследований, связанных с выполнением задания по дисциплине, а также для организации самостоятельной работы студентам доступно лабораторное оборудование и специализированные кабинеты, соответствующие действующим санитарным и противопожарным нормам, а также требованиям техники безопасности при проведении учебных и научно-производственных работ.

Наименование оборудованных помещений и помещений для самостоятельной работы	Перечень основного оборудования
Специализированная лаборатория кафедры ФНС: Лаборатория пленочных технологий. корпус L, ауд L444	Шкаф для хранения реактивов с 4 выдвижными ящиками ЛАБ-ПРО ШР4Я 50.50.195, шкаф вытяжной, рабочая поверхность - керамогранит (в комплекте) ЛАБ-ПРО ШВ 180.8, парты и стулья Количество посадочных рабочих мест для студентов - 25
Читальные залы Научной библиотеки ДВФУ с открытым доступом к фонду (корпус А - уровень 10)	Моноблок HP ProOne 400 All-in-One 19,5 (1600x900), Core i3-4150T, 4GB DDR3-1600 (1x4GB), 1TB HDD 7200 SATA, DVD+/-RW, GigE, Wi-Fi, BT, usb kbd/mse, Win7Pro (64-bit)+Win8.1Pro(64-bit), 1-1-1 Wty Скорость доступа в Интернет 500 Мбит/сек. Рабочие места для людей с ограниченными возможностями здоровья оснащены дисплеями и принтерами Брайля; оборудованы: портативными устройствами для чтения плоскочечатных текстов, сканирующими и читающими машинами видеувелечителем с возможностью регуляции цветовых спектров; увеличивающими электронными лупами и ультразвуковыми маркировщиками

Для обработки результатов моделирования и анализа результатов можно использовать стандартные программы для построения графиков в операционной системе Windows.



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«Дальневосточный федеральный университет»**  
(ДФУ)

---

НАЗВАНИЕ ШКОЛЫ (ФИЛИАЛА)

**УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ  
РАБОТЫ ОБУЧАЮЩИХСЯ**  
по дисциплине «Методы математического моделирования»  
Направление подготовки 11.04.04 Электроника и наноэлектроника  
профиль «Нанотехнологии в электронике»  
Форма подготовки очная

Владивосток  
2018

## План-график выполнения самостоятельной работы по дисциплине

№ п/п	Дата/сроки выполнения	Вид самостоятельной работы	Примерные нормы времени на выполнение	Форма контроля
1	1 неделя	Подготовка к практическому занятию №1	4 час.	Работа на занятии
2	2 неделя	Подготовка к практическому занятию №2	4 час.	Работа на занятии
3	3 недели	Подготовка к практическому занятию №3	4 час.	Работа на занятии
4	4 недели	Подготовка к лабораторной работе №1. Выполнение самостоятельного задания по теме 1	4 час.	Работа на занятии
5	5 неделя	Подготовка к лабораторной работе №2 Выполнение самостоятельного задания по теме 2	4 час.	Работа на занятии
6	6 неделя	Подготовка к практическому занятию №4	4 час.	Работа на занятии
7	7 неделя	Выполнение самостоятельного задания по теме 3	4 час.	Проверка домашней работы
8	8 неделя	Подготовка к лабораторной работе №3	4 час.	Работа на занятии
9	9 неделя	Подготовка к практическому занятию №4	4 час.	Работа на занятии
10	10 неделя	Выполнение самостоятельного задания по теме 4	4 час.	Проверка домашней работы
11	11 неделя	Подготовка к лабораторной работе №4	4 час.	Работа на занятии
12	12 неделя	Подготовка к практическому занятию №5	4 час.	Работа на занятии
13	13 неделя	Выполнение самостоятельного задания по теме 5	4 час.	Проверка домашней работы
14	14 неделя	Подготовка к лабораторной работе №5	4 час.	Проверка домашней работы
15	15 неделя	Подготовка к лабораторной работе №6	5 час.	Работа на занятии
16	16 неделя	Подготовка к лабораторной работе №7	5 час.	Работа на занятии
17	17 неделя	Подготовка к лабораторной работе №8	5 час.	Работа на занятии
18	18 неделя	Подготовка к лабораторной работе №9	5 час.	Работа на занятии
Итого			76 час.	

## **Характеристика заданий для самостоятельной работы обучающихся и методические рекомендации по их выполнению**

Задания и методические рекомендации для самостоятельной работы обеспечивают подготовку лабораторным занятиям, а также закрепление материала по пройденным темам. Их полное содержание приведено в программе и методических указаниях. Методические указания к лабораторным занятиям в электронном виде и печатном виде берутся у ведущего преподавателя.

### **Требования к представлению и оформлению результатов самостоятельной работы**

Результаты самостоятельной работы отражаются в кратких отчетах, где приводятся результаты каждого из лабораторных занятий и заданий для самостоятельной работы. Отчеты по лабораторным занятиям и самостоятельной работе предоставляются преподавателю в электронном виде (где необходимо, компьютерное моделирование и построение графиков с помощью вычислительных средств) или письменном виде (если занятие проводится без использования компьютеров).

К представлению материалов по результатам лабораторных занятий предъявляются следующие требования.

Структура краткого отчета по результатам лабораторного занятия и самостоятельной работы.

Если для данного занятия необходимо предоставить материалы в электронной форме, то они подготавливаются как текстовые документы в редакторе MS Word.

Краткий отчет по результатам лабораторного занятия, либо самостоятельной работы должен быть обобщающим документом, включать всю информацию по выполнению заданий, в том числе исходный код моделируемой задачи, построенные графики, расчеты, необходимые пояснения и иллюстрации микромагнитной структуры и т.д.

Структурно краткий отчет по результатам лабораторного занятия, либо самостоятельной работы состоит из следующих частей:

- Исходные данные к выполнению заданий – обязательная компонента отчета, начинается с новой страницы, содержат указание варианта, тему, план работы и т.д.);
- Основная часть – материалы выполнения заданий, разбивается по рубрикам, соответствующих заданиям работы, с иерархической структурой: разделы – подразделы – пункты – подпункты и т.д.
- Выводы – обязательная компонента отчета, содержит обобщающие выводы по работе (какие задачи решены, оценка результатов, что освоено при выполнении работы);

Краткий отчет по результатам лабораторного занятия и самостоятельной работы оформляется по правилам оформления письменных работ студентами ДВФУ.

Необходимо обратить внимание на следующие аспекты в оформлении кратких отчетов:

- набор текста (если необходим отчет в электронной форме);
- структурирование работы;
- оформление заголовков всех видов (рубрик-подрубрик-пунктов-подпунктов, рисунков, таблиц, приложений);
- оформление перечислений (списков с нумерацией или маркировкой);
- оформление таблиц;
- оформление иллюстраций (графики, рисунки, фотографии, схемы, «скриншоты»);

- набор и оформление математических выражений (формул);

Если набор текста осуществляется на компьютере, то необходимо придерживаться следующих требований:

- печать – на одной стороне листа белой бумаги формата А4 (размер 210 на 297 мм.);
- интервал межстрочный – полуторный;
- шрифт – Times New Roman;
- размер шрифта – 14 пт., в том числе в заголовках (в таблицах допускается 10-12 пт.);
- выравнивание текста – «по ширине»;
- поля страницы – левое – 30 мм, правое – 10 мм, верхнее и нижнее – 20 мм;
- нумерация страниц – в правом нижнем углу страницы (для страниц с книжной ориентацией), сквозная, от титульного листа до последней страницы, арабскими цифрами;
- режим автоматического переноса слов, за исключением заголовков всех уровней (перенос слов для отдельного абзаца блокируется средствами MSWord с помощью команды «Формат» – абзац при выборе опции «запретить автоматический перенос слов»).

Графическая информация: изображения микромагнитной структуры, графики, диаграммы моделей, схемы, экранные формы и т.п., должны отвечать требованиям визуальной наглядности представления иллюстративного материала как по размерам графических объектов, так и разрешающей способности отображения текстов, цветовому оформлению и другим важным пользовательским параметрам.

Рекомендуется в среде программного приложения mmDisp OOMMF настроить параметры масштабирования и цветовой схемы для наглядного отображения микромагнитной структуры.

Приведенные в отчет изображения рекомендуется отмасштабировать для заполнения страницы отчета «по ширине».

Изображения и графики в кратком отчете оформляются как рисунки, с заголовками, помещаемыми ниже области рисунков.

### **Критерии оценки выполнения самостоятельной работы**

Оценивание результатов лабораторных занятий и самостоятельных работ проводится по критериям:

- полнота и качество выполненных заданий;
- владение методами и приемами микромагнитного моделирования в исследуемых вопросах, применение специализированных программных средств (если необходимо);
- отсутствие фактических ошибок, связанных с пониманием проблемы или задачи;
- отсутствие значительных ошибок в приводимых количественных результатах.





МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«Дальневосточный федеральный университет»**  
(ДФУ)

---

---

НАЗВАНИЕ ШКОЛЫ (ФИЛИАЛА)

**ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ**  
по дисциплине **«Методы математического моделирования»**  
**Направление подготовки 11.04.04 Электроника и нанoeлектроника**  
профиль **«Нанотехнологии в электронике»**  
**Форма подготовки очная**

**Владивосток**  
**2018**

## Паспорт ФОС

Код и формулировка компетенции	Этапы формирования компетенции	
ОПК-3, способностью демонстрировать навыки работы в коллективе, порождать новые идеи (креативность)	Знает	теоретические основы физики полупроводников; основные разделы физики конденсированного состояния, для изучения полупроводниковых материалов; основные методы исследования полупроводниковых материалов.
	Умеет	пользоваться теоретическими основами физики полупроводников для описания элементов интегральных микросхем; использовать основные способы решения научных и инновационных задач наноэлектроники для достижения конкретного результата.
	Владеет	навыками интерпретации результатов моделирования для описания и дополнения результатов экспериментального исследования; навыками практического использования основ физики полупроводников для исследования интегральных микросхем; способами и навыками, позволяющими определять перспективные направления наноэлектроники, в которых активно используются или могут использоваться полупроводниковые элементы.
ОПК-5, готовностью оформлять, представлять, докладывать и аргументированно защищать результаты выполненной работы	Знает	перспективные направления наноэлектроники в которых используются или могут использоваться полупроводниковые элементы; как самостоятельно найти нужную научную литературу, описывающую конкретное изучаемое явление.
	Умеет	применять теоретические знания для математического описания модели, соответствующей конкретному экспериментальному случаю; разбираться с научными данными стороннего эксперимента и делать соответствующие выводы.
	Владеет	навыками работы литературного поиска в сети «Интернет» и системах «Web of science» и «Scopus», работы с литературой, анализа сторонних научных данных.
ПК-5, способностью делать	Знает	основные принципы работы современных видов полупроводниковых элементов.

научно-обоснованные выводы по результатам теоретических и экспериментальных исследований, давать рекомендации по совершенствованию устройств и систем, готовить научные публикации и заявки на изобретения	Умеет	выбрать методику экспериментального исследования интегральных схем, в которых используются полупроводниковые элементы.
	Владеет	теоретическими основами полупроводниковой электроники; определять перспективные направления наноэлектроники, в которых используются или могут использоваться полупроводниковые элементы; навыками применения современных подходов для исследования полупроводниковых элементов.
ПК-17, готовностью осуществлять авторское сопровождение разрабатываемых устройств, приборов и системы электронной техники на этапах проектирования и производства	Знает	особенности технологического процесса приготовления полупроводниковых элементов, литографии и плазмохимического травления; основы для проведения самостоятельного численного моделирования технологических процессов полупроводниковой электроники.
	Умеет	выбрать необходимую систему материалов для создания и проектирования интегральных микросхем.
	Владеет	навыками проектирования технологического процесса производства простейших наноструктурных объектов для создания полупроводниковых элементов и микросхем, в которых эти элементы могут быть использованы

№ п/п	Контролируемые разделы / темы дисциплины	Коды и этапы формирования компетенций	Оценочные средства		
			текущий контроль	промежуточная аттестация	
1	Введение. Основные понятия математического моделирования	ОПК-3	знает	Конспект (ПР-7)	зачет, вопросы 1-7 Собеседование (УО-1)
			умеет	Собеседование (УО-1)	зачет, задание, тип 1 Собеседование (УО-1)
			владеет	Лабораторная работа (ПР-6)	зачет, задание, тип 1 Собеседование (УО-1)

2	Основные принципы дискретного моделирования	ОПК-3, ОПК-5	знает	Конспект (ПР-7)	зачет, вопросы 8-11 Собеседование (УО-1)
			умеет	Собеседование (УО-1)	зачет, задание, тип 2 Собеседование (УО-1)
			владеет	Лабораторная работа (ПР-6)	зачет, задание, тип 2 Собеседование (УО-1)
3	Математические модели технологических процессов изготовления полупроводниковых приборов и интегральных схем	ПК-5	знает	Конспект (ПР-7)	зачет, вопросы 12-13 Собеседование (УО-1)
			умеет	Собеседование (УО-1)	зачет, задание, тип 3 Собеседование (УО-1)
			владеет	Лабораторная работа (ПР-6)	зачет, задание, тип 3 Собеседование (УО-1)
4	Математическое моделирование процессов, протекающих в полупроводниковых структурах	ПК-17	знает	Конспект (ПР-7)	зачет, вопросы 14-15 Собеседование (УО-1)
			умеет	Собеседование (УО-1)	зачет, задание, тип 4 Собеседование (УО-1)
			владеет	Лабораторная работа (ПР-6)	зачет, задание, тип 4 Собеседование (УО-1)
5	Математическое моделирование полупроводниковых приборов и элементов интегральных схем	ОПК-3, ОПК-5, ПК-5, ПК-17	знает	Конспект (ПР-7)	зачет, вопросы 16-17 Собеседование (УО-1)
			умеет	Собеседование (УО-1)	зачет, задание, тип 5 Собеседование (УО-1)

			владеет	Лабораторная работа (ПР-6)	зачет, задание, тип 5 Собеседование (УО-1)
--	--	--	---------	----------------------------	---

### Шкала оценивания уровня сформированности компетенций

Код и формулировка компетенции	Этапы формирования компетенции		критерии	показатели	баллы
ОПК-3, способность демонстрировать навыки работы в коллективе, порождать новые идеи (креативность)	Знает	теоретические основы физики полупроводников; основные разделы физики конденсированного состояния, для изучения полупроводниковых материалов; основные методы исследования полупроводниковых материалов.	Способность пересказать и объяснить учебный теоретический материал с достаточной степенью научной точности и полноты, с приведением примеров	Знает основы физики полупроводников; Знаком с основными разделами физики конденсированного состояния, для изучения полупроводниковых материалов; Знает основные методы исследования полупроводниковых материалов.	60-74
	Умеет	пользоваться теоретическими основами физики полупроводников для описания элементов интегральных микросхем; использовать основные способы решения научных и инновационных задач нанoeлектроники для достижения конкретного результата.	Уметь систематизировать научную информацию о полупроводниковой структуре, выполнять типовые задачи по расчету параметров исследуемого объекта	Умеет самостоятельно использовать теоретические знания физики полупроводников для расчета параметров исследуемого объекта; Умеет проводить математическое описание геометрической модели, соответствующей конкретному экспериментальному объекту; Умеет решать типовые научные и инновационные задачи в областях физики полупроводников.	75-89

	Владеет	<p>навыками интерпретации результатов моделирования для описания и дополнения результатов экспериментального исследования;</p> <p>навыками практического использования основ физики полупроводников для исследования интегральных микросхем;</p> <p>способами и навыками, позволяющими определять перспективные направления нанoeлектроники, в которых активно используются или могут использоваться полупроводниковые элементы.</p>	Владеет	<p>навыками практического использования основ физики полупроводников для решения простых научно-инновационных задач в области нанoeлектроники.</p>	<p>Владеет основами теории физики полупроводников;</p> <p>Владеет навыками интерпретации результатов математического моделирования для описания и дополнения результатов экспериментального исследования;</p> <p>Владеет навыками практического использования основ физики полупроводников для описания проводящих свойств моделируемой интегральной микросхемы.</p>	90-100
ОПК-5, готовностью оформлять, представлять, докладывать и аргументированно защищать результаты выполненной работы	Знает	<p>перспективные направления нанoeлектроники в которых используются или могут использоваться полупроводниковых элементы;</p> <p>как самостоятельно найти нужную научную литературу, описывающую конкретное изучаемое явление.</p>	Может	<p>пересказать и объяснить учебный теоретический материал с достаточной степенью научной точности и полноты, с приведением примеров</p>	<p>Знает основные методы контроля параметров полупроводниковых микросхем;</p> <p>Знает основные особенности технологической разработки интегральных микросхем;</p> <p>Знает основные способы и форматы представления результатов математического моделирования;</p> <p>Знает основы написания исходного кода задачи для симуляции конкретного процесса в полупроводниковой</p>	60-74

	Умеет	применять теоретические знания для математического описания модели, соответствующей конкретному экспериментальному случаю; разбираться с научными данными стороннего эксперимента и делать соответствующие выводы.	Умеет планировать, также частично организовывать простые исследования с использованием методов математического моделирования для решения задач в области нанoeлектроники	Умеет анализировать результаты моделирования и представлять полученные данные в графической форме; Умеет проводить расчеты, которые необходимы формирования исходного кода для моделирования полупроводниковых приборов; Умеет самостоятельно составлять исходный код задачи для симуляции конкретного процесса, протекающего в полупроводниковых структурах.	75-89
	Владеет	навыками работы литературного поиска в сети «Интернет» и системах «Web of science» и «Scopus», работы с литературой, анализа сторонних научных данных.	Владеет навыками организации, планирования и проведения научных исследований в области микроэлектроники и проектирования полупроводниковых схем	Владеет программным обеспечением САПР TCAD необходимым для обработки и визуализации результатов исследования, выполненного с помощью математического моделирования; Уверенно владеет навыками написания базовых конструкций для реализации вычислительных процедур по математическому моделированию;	90-100
ПК-5, способностью делать научно-	Знает	основные принципы работы современных видов	Может провести анализ работы	Знает основные методы позволяющие	60-74

<p>обоснованные выводы по результатам теоретических и экспериментальных исследований, давать рекомендации по совершенствованию устройств и систем, готовить научные публикации и заявки на изобретения</p>		полупроводниковых элементов.	электрической цепи, состоящей из набора полупроводниковых элементов	оценить производительность работы полупроводниковых микросхем, используя экспериментальные методы и метод математического моделирования.	
	Умеет	выбрать методику экспериментального исследования интегральных схем, в которых используются полупроводниковые элементы.	Умеет планировать последовательность диагностических проверок эффективности работы интегральных схем, также частично организовывать простые исследования с использованием методов математического моделирования	Умеет пользоваться пакетами для математического моделирования в соответствии с программой курса.	75-89
	Владеет	теоретическими основами полупроводниковой электроники; определять перспективные направления нанoeлектроники, в которых используются или могут использоваться полупроводниковые элементы; навыками применения современных подходов для исследования полупроводниковых элементов.	Владеет теорией полупроводниковой электроники в достаточной мере, чтобы определять перспективные направления нанoeлектроники	Владеет навыками применения современных подходов для исследования полупроводниковых элементов; Владеет способами и навыками, позволяющими определять перспективные направления нанoeлектроники, в которых активно используются или могут использоваться полупроводниковые элементы.	90-100
ПК-17, готовностью осуществлять авторское сопровождение	Знает	особенности технологического процесса приготовления полупроводниковых	Разбирается в основных технологических процессах на производстве	Знает алгоритм технологических процессов, которые позволяют производить новые	60-74



разрабатываемых устройств, приборов и системы электронной техники на этапах проектирования и производства		элементов, литографии и плазмохимического травления; основы для проведения самостоятельного численного моделирования технологических процессов полупроводниковой электронике.	полупроводниковых элементов	полупроводниковые элементы с использованием литографии и плазмохимического травления; Знает основы работы в одном из пакетов микромагнитного моделирования.	
	Умеет	выбрать необходимую систему материалов для создания и проектирования интегральных микросхем.	Умеет классифицировать материалы, подходящие для производства необходимого полупроводникового элемента	Умеет на практике подбирать материалы для создания необходимого элемента интегральных микросхем с заданными параметрами и максимальной эффективностью.	75-89
	Владеет	навыками проектирования технологического процесса производства простейших наноструктурных объектов для создания полупроводниковых элементов и микросхем, в которых эти элементы могут быть использованы	Владеет навыками формирования шаблонов наноструктур методом литографии и последующим формированием многослойных полупроводниковых структур методами физического осаждения материала в вакууме	Владеет приемами решения основных физических и математических задач, используя пакеты DESSIS, MDRAW, TECPLOT в программе математического моделирования САПР ISE TCAD в соответствии с программой курса; Владеет навыком использования методов оптимизации и планирования для успешной организации исследований.	90-100

**Методические рекомендации, определяющие процедуры оценивания результатов освоения дисциплины**

**Текущая аттестация студентов**

Текущая аттестация студентов по дисциплине «Методы математического моделирования» проводится в соответствии с локальными нормативными актами ДВФУ и является обязательной.

Текущая аттестация по дисциплине «Методы математического моделирования» проводится в форме лабораторных и практических занятий, а также самостоятельных работ, по результатам которых производится оценка результатов обучения студентов. Оценка осуществляется ведущим преподавателем.

Объектами оценивания выступают:

- учебная дисциплина (активность на занятиях, своевременность выполнения различных видов заданий, посещаемость всех видов занятий по аттестуемой дисциплине);
- уровень овладения практическими умениями и навыками по всем видам учебной работы;
- результаты самостоятельной работы.

Оценивание результатов освоения дисциплины на этапе текущей аттестации проводится в соответствии с используемыми оценочными средствами и критериями.

### **Критерии оценки кратких отчетов по результатам практических занятий**

Оценивание результатов работы на лабораторном занятии, а также выполнения самостоятельной работы проводится при представлении краткого отчета в электронном или письменном виде по двухбалльной шкале: «зачтено», «не зачтено».

Оценка «зачтено» выставляется студенту, если он представляет преподавателю краткий отчет, удовлетворяющий требованиям по поставленным заданиям, демонстрирует владение методами и приемами теоретических и/или практических аспектов работы.

Оценка «не зачтено» выставляется студенту, если он не владеет методами и приемами теоретических и/или практических аспектов, рассматриваемых на занятии, допускает существенные ошибки в работе, представляет неполный отчет по выполнению заданий.

### **Промежуточная аттестация студентов**

Промежуточная аттестация студентов по дисциплине «Методы математического моделирования» проводится в соответствии с локальными нормативными актами ДВФУ и является обязательной.

Промежуточная аттестация по дисциплине «Методы математического моделирования» проводится в виде зачета, форма сдачи зачета – «устный опрос в форме ответов на вопросы», «практические задания по типам». Допуск к сдаче зачета возможен только после защиты отчетов по всем лабораторным работам курса и выполнения всех самостоятельных заданий.

### **Критерии выставления оценки студенту на экзамене по дисциплине «Методы математического моделирования»:**

Баллы (рейтинговой оценки)	Оценка (стандартная)	Требования к сформированным компетенциям
86-100	«отлично»	Оценка «отлично» выставляется студенту, если он глубоко и прочно усвоил программный материал, исчерпывающе, последовательно, четко и логически стройно его излагает, умеет тесно увязывать теорию с практикой, свободно справляется с задачами, вопросами и другими видами применения знаний, причем не затрудняется с ответом при видоизменении заданий, использует в ответе материал монографической литературы, правильно обосновывает принятое решение, владеет разносторонними навыками и приемами выполнения практических задач.
76-85	«хорошо»	Оценка «хорошо» выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, не допуская существенных неточностей в ответе на вопрос, правильно применяет теоретические положения при решении практических вопросов и задач, владеет необходимыми навыками и приемами их выполнения.
61-75	«удовлетворительно»	Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, если он имеет знания только основного материала, но не усвоил его деталей, допускает неточности, недостаточно

		правильные формулировки, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, испытывает затруднения при выполнении практических работ.
0-60	«неудовлетворительно»	Оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту, который не знает значительной части программного материала, допускает существенные ошибки, неуверенно, с большими затруднениями выполняет практические работы. Как правило, оценка «неудовлетворительно» ставится студентам, которые не могут продолжить обучение без дополнительных занятий по соответствующей дисциплине.

## **Оценочные средства для промежуточной аттестации**

### **Вопросы к экзамену Собеседование (УО-1)**

1. Зачем нужно легирование подложки бором в начале технологических операций в примере проекта n-МОП транзистора?
2. Как повлияет учет саморазогрева рассмотренного n-МОП транзистора на вид выходных характеристик?
3. Каковы цели и задачи приборно-технологического моделирования? Описать типовую последовательность моделирования.
4. Описать структуру пакета Sentaurus и назначение его основных модулей.
5. Что представляет собой концепция «виртуальной фабрики»?
6. Какова последовательность моделирования технологии? Какие данные необходимы и в каком виде они задаются?
7. Какова последовательность моделирования приборов? Какие данные необходимы и в каком виде они задаются?
8. Методы формирования полупроводниковых элементов.
9. Назовите основные технологические процессы КМОП-технологии.
10. Опишите подходы и модели, используемые для моделирования имплантации (диффузии, эпитаксии, окисления, травления, осаждения).
11. Что влияет на выбор моделей при моделировании имплантации?
12. Опишите граничные условия при моделировании имплантации и условия их применения.

13. Какие факторы, присущие реальному оборудованию, влияют на точность моделирования имплантации (не могут быть учтены)?
14. Какие эффекты, связанные с диффузией, не позволяет учесть программа Sprocess?
15. Опишите модели диффузии и области их применения.
16. Опишите граничные условия при моделировании диффузии и условия их применения.
17. Опишите процесс моделирования окисления. Какие модели используются для моделирования этого процесса?
18. Что такое кластеризация дефектов? Назовите типы кластеров дефектов. На что они влияют?
19. Опишите основные модели кластеризации примеси и дефектов.
20. Опишите структуру файла для приборного моделирования.
21. Назовите основные модели переноса заряда в полупроводнике. Укажите диапазоны их применимости.
22. Опишите граничные условия при приборном моделировании.
23. Назовите модели подвижности, используемые при приборном моделировании. Какие эффекты эти модели учитывают, а какие нет?
24. Назовите основные механизмы возникновения токов утечек в субмикронных транзисторах.
25. В чем преимущества и недостатки нанопроволочных и «плавниковых» транзисторных структур по сравнению с планарными?
26. Какие существуют способы подавления kink-эффекта в «плавниковых» структурах?
27. Что такое калибровка? Зачем она нужна?
28. Опишите последовательность калибровки.
29. Что такое Advanced Calibration? Как с помощью этого инструмента производится на-стройка моделей?
30. Опишите последовательность калибровки имплантации.
31. Опишите последовательность калибровки процесса диффузии.

32. Опишите процесс калибровки на основе имеющейся ВФХ.
33. Какая точность и в каком диапазоне может быть достигнута после калибровки? (качественно, указать ограничения).
34. Методы контроля технологических процессов в реальных полупроводниковых приборах.
35. Назовите основные рабочие показатели и характеристики транзистора в готовой цепи.

### **Типы экзаменационных заданий**

Тип 1. Рассчитать передаточную характеристику транзистора без легирования подложки бором и сравнить с исходной передаточной характеристикой. Объяснить результат.

Тип 2. Рассчитать семейство выходных характеристик с учетом саморазогрева структуры. При этом в командном файле DESSIS необходимо добавить термический контакт (термод) на нижнюю поверхность подложки, а в секции Physics указать использование термодинамических уравнений и учесть зависимость скорости генерации от температуры.

Тип 3. Провести расчет семейства выходных характеристик с учетом саморазогрева структуры. В секции Plot указать распределение температуры, и в секции Solve при изменяющемся напряжении на стоке дополнительно решить уравнения термодинамики.

Тип 4. Учитывая саморазогрева структуры провести расчет семейства выходных характеристик. Определить наиболее горячие участки n-МОП транзистора.

Тип 5. Построить зависимости крутизны передаточной характеристики и сопротивления сток-исток в открытом состоянии от длины канала в диапазоне  $3 \times 0.7$  мкм.

### **Оценочные средства для текущей аттестации**

Типовые задания для самостоятельной работы студентов

### Задание по теме 1

- В соответствии с индивидуальным заданием, выдаваемым преподавателем из списка вариантов или предложенным по своему усмотрению, провести работу по проектированию структурной схемы силового преобразователя.
- Провести синтез структуры силового преобразователя импульсно-модуляционного типа по индивидуальному заданию.
- Составить ТЗ – задания на расчет входных и выходных параметров преобразователя электрической энергии: мощностные и частотные характеристики.
- Рассмотреть режимы работы преобразователя, предусмотреть приборы (адаптеры) для согласования уровней и типов сигналов.
- Разработать структурную схему аппаратной части силового преобразователя.
- Построить систему дифференциальных уравнений, описывающих силовую цепь импульсно-модуляционного преобразователя.
- Создать математическую модель законов управления коммутационными элементами схемы в виде временных циклов.

### Задание по теме 2

- В соответствии с индивидуальным заданием и составленным выше ТЗ, провести работу по проектированию каналов импульсно-модуляционного управления работой коммутационных элементов силового преобразователя.
- Построить математическую модель системы управления силовым преобразователем в базисе коммутационных разрывных функций.
- Произвести математическое описание обратной связи, выбор и расчет регулятора методами теории автоматического управления для линеаризованной модели.

- Обосновать выбор вида модуляции. Сформулировать алгоритм формирования импульсной последовательности.
- Построить решения системы дифференциальных уравнений на участках непрерывности коммутационной функции.
- Составить уравнения для поиска коммутационных точек, построить алгоритмы поиска и уточнения моментов коммутации.
- Отработать алгоритм построения решений методом установления.
- Подобрать необходимое время преобразования. Определиться с тактовой частотой МПСУ и остальными параметрами математической модели.
- Произвести численный эксперимент по методу установления (численного анализа).
- При необходимости построить имитационную модель преобразователя в известной САПР и произвести сравнение результатов.

### Задание по теме 3

- Построить приближенное решение системы дифференциальных уравнений с разрывными (коммутационными) функциями методом установления при различном наборе параметров.
- Произвести параметрический синтез преобразователя с точки зрения поиска оптимума по заданному перечню целевых функций.
- Осмыслить принципы построения бифуркационной диаграммы при вариации параметров устройства.
- Произвести оценку адекватности модели посредством сравнения расчетных параметров, вычислительных результатов и экспериментальных данных.
- Построить стробоскопическое отображение системы уравнений импульсно-модуляционного преобразователя, по аналогии с отображением Пуанкаре.
- Принять во внимание при моделировании тип импульсной модуляции и характер узловых точек.



- Спланировать численный эксперимент по выявлению и классификации всех периодических движений –  $m$ -циклов.
- Разработать алгоритм построения бифуркационной диаграммы, основывающийся на стробоскопическом отображении типа Пуанкаре.
- Построить динамические характеристики – вычислить параметры переходных процессов при сбросе/набросе нагрузки.

#### Задание по теме 4

- Получить индивидуальное задание на построение математической модели электропривода из списка вариантов. Если в индивидуальном задании отсутствует электропривод, то задание на проектирование ЭП выдается преподавателем дополнительно.
- Провести работу по моделированию электромеханической части ЭП.
- С учетом заданной точности позиционирования рабочего тела электропривода разработать СУ электроприводом.
- Рассчитать статические и динамические характеристики электропривода.
- Спроектировать регулятор, настроенный на тот или иной оптимум, в зависимости от требуемого характера движения рабочего тела: рассчитать корректирующее звено.
- Рассмотреть вопрос модального ПИ-регулятора.
- Проработать измерение переменных состояний в электроприводе.
- Спроектировать наблюдающие устройства полного (или пониженного) порядка в структуре систем управления электроприводом.
- Построить динамические характеристики скорости и нагрузочного момента при сбросе/набросе-реверсе нагрузки. Постановка и решение оптимальной задачи по точности электропривода.
- Рассмотреть вариант решения оптимизационной задачи в условиях ограничения координат (скорости, тока якоря). Постановка и решение оптимальной задачи по быстродействию системы.

- Построение СУ с адаптацией к возмущению. Построение системы «Объект – астатическое наблюдающее устройство – регулятор с компенсационным каналом».
- Построение системы управления электроприводом как адаптивной системы с переменной структурой.

#### Задание по теме 5

- В соответствии с ТЗ, провести работу по анализу динамических процессов в преобразователе.
- Провести моделирование переходных процессов в измерительных и управляющих системах в соответствии с вариантом.
- Провести синтез корректирующих звеньев с учетом нелинейности системы.
- Используя математические инструменты гармонического анализа, провести спектральный анализ найденных  $m$ -циклов.
- Проверить адекватность модели, учитывая дрейф характеристик и помехи измерения.
- Построить модель динамических погрешностей и внешних воздействий, включающих задачи управления.
- Соотнести рабочую зону в пространстве параметров преобразователя с величинами предполагаемой деградации параметров.
- Построить внутренние области притяжения  $m$ -циклов в фазовом пространстве и соотнести их с вероятной величиной внешних воздействий.
- Произвести расчет надежности.