

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

Кафедра полупроводниковых приборов и микроэлектроники

“УТВЕРЖДАЮ”

ДЕКАН РЭФ

д.т.н. Хрусталеv В. А.

“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**  
**Математическое моделирование электронных систем**

Образовательная программа: 11.03.04 Электроника и наноэлектроника, профиль:  
Микроэлектроника и наноэлектроника

Курс: 4, семестр : 8

Факультет радиотехники и электроники,

|    |                                                                                                      | Семестр    |
|----|------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| №  | Вид деятельности                                                                                     | 8          |
| 1  | Всего зачетных единиц (кредитов)                                                                     | 6          |
| 2  | Всего часов                                                                                          | 216        |
| 3  | Всего занятий в контактной форме, час.                                                               | 74         |
| 4  | Лекции, час.                                                                                         | 14         |
| 5  | Практические занятия, час.                                                                           | 14         |
| 6  | Лабораторные занятия, час.                                                                           | 28         |
| 7  | из них в активной и интерактивной форме, час.                                                        | 10         |
| 8  | Аттестация, час.                                                                                     | 2          |
| 9  | Консультации, час.                                                                                   | 16         |
| 10 | Самостоятельная работа, час.                                                                         | 142        |
| 11 | Виды самостоятельной работы (курсовой проект, курсовая работа, РГЗ, подготовка к контрольной работе) | РГЗ контр. |
| 12 | Вид аттестации                                                                                       | ДЗ         |

Рабочая программа составлена на основании федерального государственного образовательного стандарта высшего образования по направлению (специальности): 11.03.04 Электроника и нанoeлектроника

ФГОС введен в действие приказом №218 от 12.03.2015 г. , дата утверждения: 07.04.2015 г.

Место дисциплины в структуре учебного плана: Блок 1, вариативная, по выбору студента

Рабочая программа разработана на основе компетентностной модели выпускника по направлению (специальности): 11.03.04 Электроника и нанoeлектроника

Рабочая программа обсуждена на заседании кафедры

ППиМЭ, протокол заседания кафедры №5 от 20.06.2017

Утверждена на совете факультета радиотехники и электроники, протокол № 6 от 21.06.2017

Программу разработал:

старший преподаватель, Калинин С. В.

Заведующий кафедрой:

с.н.с., д.ф-м.н. Гайслер В. А.

Ответственный за образовательную программу:

заведующий кафедрой Гайслер В. А.

## 1. Внешние требования

Таблица 1.1

|                                                                                                                                                                                                                                                   |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Компетенция ФГОС: ОПК.1 способность представлять адекватную современному уровню знаний научную картину мира на основе знания основных положений, законов и методов естественных наук и математики; в части следующих результатов обучения:</b> |
| у1. умеет работать с системными естественнонаучными моделями объектов профессиональной деятельности                                                                                                                                               |
| <b>Компетенция ФГОС: ОПК.9 способность использовать навыки работы с компьютером, владеть методами информационных технологий, соблюдать основные требования информационной безопасности; в части следующих результатов обучения:</b>               |
| у11. умеет пользоваться наиболее распространенными офисными и математическими пакетами прикладных программ                                                                                                                                        |
| <b>Компетенция ФГОС: ПК.3 готовность анализировать и систематизировать результаты исследований, представлять материалы в виде научных отчетов, публикаций, презентаций; в части следующих результатов обучения:</b>                               |
| з1. методы моделирования приборов и устройств вакуумной, плазменной, твердотельной, микроволновой электроники;                                                                                                                                    |

## 2. Требования НГТУ к результатам освоения дисциплины

Таблица 2.1

| Результаты изучения дисциплины по уровням освоения (иметь представление, знать, уметь, владеть)                                                                | Формы организации занятий                                                 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| <i>Математическое моделирование электронных систем</i>                                                                                                         |                                                                           |
| <b>ОПК.1.у1 умеет работать с системными естественнонаучными моделями объектов профессиональной деятельности</b>                                                |                                                                           |
| 1.об основных особенностях элементной базы СБИС и УБИС                                                                                                         | Лекции; Практические занятия; Лабораторные работы; Самостоятельная работа |
| 2.об иерархии транспортных моделей переноса в микро и нанoeлектронике                                                                                          | Лекции; Практические занятия; Лабораторные работы; Самостоятельная работа |
| 3.о современных тенденциях развития физики и технологии нанотранзисторов и микросистемной техники                                                              | Лекции; Практические занятия; Лабораторные работы; Самостоятельная работа |
| 4.Методику сквозного приборно-технологического моделирования (TCAD)                                                                                            | Лекции; Практические занятия; Лабораторные работы; Самостоятельная работа |
| 5.Понятийный аппарат (терминологию) дисциплины                                                                                                                 | Лекции; Практические занятия; Лабораторные работы; Самостоятельная работа |
| 6.Основы моделирования процесса ионной имплантации                                                                                                             | Лекции; Практические занятия; Лабораторные работы; Самостоятельная работа |
| 7.Основы моделирования процесса термического окисления кремния                                                                                                 | Лекции; Практические занятия; Лабораторные работы; Самостоятельная работа |
| 8.Основы моделирования диффузионных процессов                                                                                                                  | Лекции; Практические занятия; Лабораторные работы; Самостоятельная работа |
| 9.Численно вычислять основные параметры технологических режимов полупроводниковых слоев формируемых структур в точном соответствии с технологическим маршрутом | Лекции; Лабораторные работы; Самостоятельная работа                       |
| 10.Численно вычислять основные электрофизические параметры и характеристики параметры современных КМОПТ                                                        | Лекции; Практические занятия; Лабораторные работы; Самостоятельная работа |

|                                                                                                                                          |                                                                           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| <b>ПК.3.31 методы моделирования приборов и устройств вакуумной, плазменной, твердотельной, микроволновой электроники;</b>                |                                                                           |
| 11.Знать методы моделирования приборов и устройств вакуумной, плазменной, твердотельной, микроволновой электроники;                      | Лекции                                                                    |
| <b>ОПК.9.y11 умеет пользоваться наиболее распространенными офисными и математическими пакетами прикладных программ</b>                   |                                                                           |
| 12.Организационную структуру TCAD Sentaurus                                                                                              | Лекции; Практические занятия; Лабораторные работы; Самостоятельная работа |
| 13.Структуру и особенности командного файла для моделирования технологических процессов в приложении SProcess                            | Лекции; Практические занятия; Лабораторные работы; Самостоятельная работа |
| 14.Структуру и особенности командного файла для моделирования электрофизических параметров и характеристик приборов в приложении SDevice | Лекции; Практические занятия; Лабораторные работы; Самостоятельная работа |
| 15.Численно калибровать применяемые TCAD-модели и управлять адаптивной расчётной сеткой                                                  | Лекции; Практические занятия; Лабораторные работы; Самостоятельная работа |
| 16.Применения математических моделей TCAD Sentaurus                                                                                      | Лекции; Практические занятия; Лабораторные работы; Самостоятельная работа |

### 3. Содержание и структура учебной дисциплины

Таблица 3.1

| Темы лекций                                                                     | Активные формы, час. | Часы | Ссылки на результаты обучения | Учебная деятельность                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|---------------------------------------------------------------------------------|----------------------|------|-------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Семестр: 8</b>                                                               |                      |      |                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| <b>Дидактическая единица: Общие вопросы наноэлементов и наносистем</b>          |                      |      |                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| 1. Элементная база современной микро и наноэлектроники и микросистемной техники | 0                    | 2    | 1, 11                         | Нанотехнологии, наноэлементы и наносистемы. Элементная база современной микро и наноэлектроники. Миниатюризация и ее влияние на параметры КМОПТ. Физические эффекты, связанные с процессом миниатюризации. Технологические способы подавления паразитных эффектов в КМОПТ: ретроградный карман, LDD, HALO и КНИ структуры. |
| 2. Математические модели для наноэлектроники                                    | 0                    | 2    | 1, 16, 2                      | Схема Даттона для математических моделей наноэлектроники. Иерархия транспортных моделей в наноэлектронике. Взаимосвязь между транспортными механизмами и характерной длиной наноэлемента. Классификационная схема математических моделей.                                                                                  |
| <b>Дидактическая единица: Основные особенности TCAD-моделирования</b>           |                      |      |                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |

|                                                                                         |   |   |                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|---|---|------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 3. Приборно-технологическое моделирование                                               | 0 | 2 | 2, 3, 4          | Общая характеристика метода приборно-технологического моделирования и его возможности. Схема сквозного TCAD-моделирования                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| 4. Структура TCAD SenTaurus                                                             | 0 | 2 | 12, 13, 14, 2, 4 | Общая структура TCAD SenTaurus. Входные/выходные файлы основных приложений TCAD SenTaurus. Основные схемы моделирования в TCAD SenTaurus. Общая структура командного файла для SProcess. Общая структура командного файла для SDevice                                                                                                                                                                                   |
| <b>Дидактическая единица: Моделирование технологических процессов в TCAD SenTaurus</b>  |   |   |                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| 5. Модели ионной имплантации                                                            | 0 | 1 | 12, 13, 4, 5, 6  | Основные особенности моделировании процесса ионной имплантации(ИИ). Системы координат, используемые для моделирования процесса ИИ. Основные модельные параметры имплантационных профилей легирования. Общая характеристика метода Монте-Карло при моделировании ИИ. Аппроксимационные модели ИИ. Модель Гаусса. Аппроксимационные модели ИИ. Модель Пирсон-IV. Двумерное моделирование бокового распределения ионов ИИ. |
| 6. Модели термического окисления кремния                                                | 0 | 1 | 13, 16, 5, 7     | Основные физические процессы при термическом окислении кремния. Модели Дила-Гроува и Массанда для процесса термического окисления. Вариативность команды , моделирующей процесс термического окисления в приложении SProcess                                                                                                                                                                                            |
| 7. Диффузионные модели                                                                  | 0 | 2 | 12, 13, 15, 5, 8 | Концентрационные модели коэффициента диффузии. Модель эффективного коэффициента диффузии. Диффузионные модели в TCAD SenTaurus: Модель с постоянным уровнем Ферми, Трехпоточковая модель, Пятипоточковая модель.                                                                                                                                                                                                        |
| <b>Дидактическая единица: Электрофизическое моделирование приборов в TCAD SenTaurus</b> |   |   |                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |

|                                      |   |   |                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|--------------------------------------|---|---|---------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 8. Основные электрофизические модели | 0 | 2 | 10, 12, 14, 2, 5, 9 | Исходные данные для электрофизического моделирования в SDevice. DD модель и краевые условия в диффузионно-дрейфовой модели полупроводникового прибора. Термодинамическая модель полупроводникового прибора в приложении "SDevice". Гидродинамическая модель полупроводникового прибора в приложении "SDevice". |
|--------------------------------------|---|---|---------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Таблица 3.2

| Темы лабораторных работ                                                                                         | Активные формы, час. | Часы | Ссылки на результаты обучения | Учебная деятельность                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|------|-------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Семестр: 8</b>                                                                                               |                      |      |                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| <b>Дидактическая единица: Основные особенности TCAD-моделирования</b>                                           |                      |      |                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| 1. Моделирование технологических параметров нанопереходов на базе основных оболочек и подсистем TCAD Sentaaurus | 1                    | 8    | 12, 13, 4, 5, 9               | Общая структура TCAD SenTaurus. Входные/выходные файлы основных приложений TCAD SenTaurus. Основные схемы моделирования в TCAD SenTaurus. Общая структура командного файла для SProcess. Аппроксимационные модели ИИ. Модель Гаусса. Аппроксимационные модели ИИ. Модель Пирсон-4.. Модели Дила-Гроува и Массанда для процесса термического окисления. Вариативность команды , моделирующей процесс термического окисления в приложении SProcess.Концентрационные модели коэффициента диффузии. Модель эффективного коэффициента диффузии. Диффузионные модели в TCAD SenTaurus: Модель с постоянным уровнем Ферми. Трехпоточная модель |
| <b>Дидактическая единица: Моделирование технологических процессов в TCAD SenTaurus</b>                          |                      |      |                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |

|                                                                                                                  |   |   |                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|---|---------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2. Технологическое моделирование двумерной структуры МОПТ на напряженном кремнии                                 | 1 | 8 | 1, 12, 13, 16, 3, 5, 6, 7, 8, 9 | Нанотехнологии, нанозлементы и наносистемы. Элементная база современной микро и нанoeлектроники. Миниатюризация и ее влияние на параметры КМОПТ. Физические эффекты, связанные с процессом миниатюризации. Технологические способы подавления паразитных эффектов в КМОПТ: ретроградный карман, LDD, HALO и КНИ структуры. Аппроксимационные модели ИИ. Модель Гаусса. Аппроксимационные модели ИИ. Модель Пирсон-IV. Двумерное моделирование бокового распределения ионов ИИ. Модели термического окисления и диффузии. DD модель и краевые условия в диффузионно-дрейфовой модели полупроводникового прибора. Модель влияния механических напряжений на параметры МОПТ |
| 3. Сквозное моделирование электрофизических характеристик кремниевых полупроводниковых структур в TCAD Sentaurus | 1 | 4 | 12, 13, 14, 15, 16, 2, 4, 9     | . Схема сквозного TCAD-моделирования. Общая структура TCAD SenTaurus. Входные/ выходные файлы основных приложений TCAD SenTaurus. Основные схемы моделирования в TCAD SenTaurus. Общая структура командного файла для SProcess. Общая структура командного файла для SDevice.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| <b>Дидактическая единица: Электрофизическое моделирование приборов в TCAD SenTaurus</b>                          |   |   |                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| 4. Моделирование электрофизических параметров и характеристик НЕМТ-структур в TCAD Sentaurus                     | 2 | 8 | 10, 12, 14, 16, 2, 4            | Исходные данные для электрофизического моделирования в SDevice. DD модель и краевые условия в диффузионно-дрейфовой модели полупроводникового прибора. Термодинамическая модель полупроводникового прибора в приложении "SDevice". Гидродинамическая модель полупроводникового прибора в приложении "SDevice".                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |

Таблица 3.3

| Темы практических занятий | Активные формы, час. | Часы | Ссылки на результаты обучения | Учебная деятельность |
|---------------------------|----------------------|------|-------------------------------|----------------------|
|---------------------------|----------------------|------|-------------------------------|----------------------|

|                                                                                        |   |   |                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|----------------------------------------------------------------------------------------|---|---|------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Семестр: 8</b>                                                                      |   |   |                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| <b>Дидактическая единица: Общие вопросы наноэлементов и наносистем</b>                 |   |   |                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 1. Общие вопросы наноэлементов и наносистем                                            | 1 | 2 | 1, 16, 2, 3      | <p>Нанотехнологии, наноэлементы и наносистемы. Элементная база современной микро и нанoeлектроники. Миниатюризация и ее влияние на параметры КМОПТ. Физические эффекты, связанные с процессом миниатюризации. Технологические способы подавления паразитных эффектов в КМОПТ: ретроградный карман, LDD, HALO и КНИ структуры. Схема Даттона для математических моделей нанoeлектроники. Иерархия транспортных моделей в нанoeлектронике. Взаимосвязь между транспортными механизмами и характерной длиной наноэлемента. Классификационная схема математических моделей.</p> |
| <b>Дидактическая единица: Основные особенности TCAD-моделирования</b>                  |   |   |                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 2. Основные особенности TCAD-моделирования                                             | 1 | 2 | 12, 13, 14, 4, 5 | <p>Общая структура TCAD SenTaurus. Входные/выходные файлы основных приложений TCAD SenTaurus. Основные схемы моделирования в TCAD SenTaurus. Общая структура командного файла для SProcess. Общая структура командного файла для SDevice. Схема сквозного TCAD-моделирования.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| <b>Дидактическая единица: Моделирование технологических процессов в TCAD SenTaurus</b> |   |   |                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |



|                                                                                         |   |   |                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|---|---|---------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 3. Моделирование технологических процессов в TCAD SenTaurus                             | 2 | 6 | 12, 13, 15, 4, 5, 6, 7, 8 | Основные особенности моделировании процесса ионной имплантации(ИИ). Системы координат, используемые для моделирования процесса ИИ. Основные модельные параметры имплантационных профилей легирования. Общая характеристика метода Монте-Карло при моделировании ИИ. Аппроксимационные модели ИИ. Модель Гаусса. Аппроксимационные модели ИИ. Модель Пирсон-IV. Двумерное моделирование бокового распределения ионов ИИ. Основные физические процессы при термическом окислении кремния. Модели Дила-Гроува и Массанда для процесса термического окисления. Вариативность команды , моделирующей процесс термического окисления в приложении SProcess. Концентрационные модели коэффициента диффузии. Модель эффективного коэффициента диффузии. Диффузионные модели в TCAD SenTaurus: Модель с постоянным уровнем Ферми, Трехпотоковая модель, Пятипотоковая модель |
| <b>Дидактическая единица: Электрофизическое моделирование приборов в TCAD SenTaurus</b> |   |   |                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| 4. Основные электрофизические модели                                                    | 1 | 4 | 10, 14, 15, 16, 2, 5      | Исходные данные для электрофизического моделирования в SDevice. DD модель и краевые условия в диффузионно-дрейфовой модели полупроводникового прибора. Термодинамическая модель полупроводникового прибора в приложении "SDevice". Гидродинамическая модель полупроводникового прибора в приложении "SDevice"                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |

#### 4. Самостоятельная работа обучающегося

| №                 | Виды самостоятельной работы | Ссылки на результаты обучения | Часы на выполнение | Часы на консультации |
|-------------------|-----------------------------|-------------------------------|--------------------|----------------------|
| <b>Семестр: 8</b> |                             |                               |                    |                      |
| 1                 | Контрольные работы          | 10, 13, 14, 4, 9              | 9                  | 0                    |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                         |                                                   |    |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|---------------------------------------------------|----|----|
| : Моделирование нанотранзисторов в TCAD SENTAUROS : методическое руководство к лабораторному практикуму для 4 курса РЭФ дневного отделения / Новосиб. гос. техн. ун-т ; [сост.: С. В. Калинин и др.]. - Новосибирск, 2010. - 103 с. : ил., табл.. - Режим доступа: <a href="http://elibrary.nstu.ru/source?bib_id=vtls000146909">http://elibrary.nstu.ru/source?bib_id=vtls000146909</a>                                                                                                           |                         |                                                   |    |    |
| 2                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | РГЗ                     | 10, 15, 16, 9                                     | 9  | 0  |
| : Моделирование нанотранзисторов в TCAD SENTAUROS : методическое руководство к лабораторному практикуму для 4 курса РЭФ дневного отделения / Новосиб. гос. техн. ун-т ; [сост.: С. В. Калинин и др.]. - Новосибирск, 2010. - 103 с. : ил., табл.. - Режим доступа: <a href="http://elibrary.nstu.ru/source?bib_id=vtls000146909">http://elibrary.nstu.ru/source?bib_id=vtls000146909</a>                                                                                                           |                         |                                                   |    |    |
| 3                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Подготовка к занятиям   | 1, 6, 7, 8                                        | 79 | 0  |
| Работа с конспектом лекций, методическими указаниями к лабораторным работам, с рекомендованной литературой: Моделирование нанотранзисторов в TCAD SENTAUROS : методическое руководство к лабораторному практикуму для 4 курса РЭФ дневного отделения / Новосиб. гос. техн. ун-т ; [сост.: С. В. Калинин и др.]. - Новосибирск, 2010. - 103 с. : ил., табл.. - Режим доступа: <a href="http://elibrary.nstu.ru/source?bib_id=vtls000146909">http://elibrary.nstu.ru/source?bib_id=vtls000146909</a> |                         |                                                   |    |    |
| 4                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Подготовка к аттестации | 1, 10, 12, 13, 14, 15, 16, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 | 45 | 16 |
| Подготовка к защитах тем и экзамену по рекомендованным источникам: Моделирование нанотранзисторов в TCAD SENTAUROS : методическое руководство к лабораторному практикуму для 4 курса РЭФ дневного отделения / Новосиб. гос. техн. ун-т ; [сост.: С. В. Калинин и др.]. - Новосибирск, 2010. - 103 с. : ил., табл.. - Режим доступа: <a href="http://elibrary.nstu.ru/source?bib_id=vtls000146909">http://elibrary.nstu.ru/source?bib_id=vtls000146909</a>                                          |                         |                                                   |    |    |

## 5. Технология обучения

Для организации и контроля самостоятельной работы обучающихся, а также проведения консультаций применяются информационно-коммуникационные технологии (табл. 5.1).

Таблица 5.1

| Деятельность                  | Информационно-коммуникационные технологии |
|-------------------------------|-------------------------------------------|
| Информирование                | e-mail                                    |
| Консультирование              | e-mail                                    |
| Контроль                      | e-mail                                    |
| Размещение учебных материалов | e-mail                                    |

## 6. Правила аттестации обучающихся по учебной дисциплине

Для аттестации обучающихся по дисциплине используется балльно-рейтинговая система (БРС), позволяющая выставять оценки по традиционной шкале и 15-уровневой ECTS. Краткая информация о БРС приведена в табл. 6.1.

Таблица 6.1

| Оцениваемые виды деятельности обучающихся   | Мин. балл | Максимальный балл |
|---------------------------------------------|-----------|-------------------|
| <b>Семестр: 8</b>                           |           |                   |
| <i>Подготовка к занятиям:</i>               | 0         |                   |
| <i>Дополнительная учебная деятельность:</i> | 0         |                   |
| <i>Лекция:</i>                              | 2         | 4                 |
| <i>Лабораторная:</i>                        | 20        | 40                |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |    |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|----|
| <b>Практические занятия:</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 8  | 16 |
| <b>Контрольные работы:</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 5  | 10 |
| Контролирующие материалы (список вопросов) приводятся в "Моделирование нанотранзисторов в TCAD SENTAURUS : методическое руководство к лабораторному практикуму для 4 курса РЭФ дневного отделения / Новосиб. гос. техн. ун-т ; [сост.: С. В. Калинин и др.]. - Новосибирск, 2010. - 103 с. : ил., табл.. - Режим доступа: <a href="http://elibrary.nstu.ru/source?bib_id=vtls000146909">http://elibrary.nstu.ru/source?bib_id=vtls000146909</a> " |    |    |
| <b>РГЗ:</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 5  | 10 |
| Контролирующие материалы (список вопросов) приводятся в "Моделирование нанотранзисторов в TCAD SENTAURUS : методическое руководство к лабораторному практикуму для 4 курса РЭФ дневного отделения / Новосиб. гос. техн. ун-т ; [сост.: С. В. Калинин и др.]. - Новосибирск, 2010. - 103 с. : ил., табл.. - Режим доступа: <a href="http://elibrary.nstu.ru/source?bib_id=vtls000146909">http://elibrary.nstu.ru/source?bib_id=vtls000146909</a> " |    |    |
| <b>Зачет:</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 10 | 20 |
| Контролирующие материалы (список вопросов) приводятся в "Моделирование нанотранзисторов в TCAD SENTAURUS : методическое руководство к лабораторному практикуму для 4 курса РЭФ дневного отделения / Новосиб. гос. техн. ун-т ; [сост.: С. В. Калинин и др.]. - Новосибирск, 2010. - 103 с. : ил., табл.. - Режим доступа: <a href="http://elibrary.nstu.ru/source?bib_id=vtls000146909">http://elibrary.nstu.ru/source?bib_id=vtls000146909</a> " |    |    |

В таблице 6.2 представлено соответствие форм контроля заявляемым требованиям к результатам освоения дисциплины.

Таблица 6.2

| Коды компетенций ФГОС | Результаты обучения                                                                                            | Формы контроля |             |            |       |
|-----------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|-------------|------------|-------|
|                       |                                                                                                                | Защита Л/Р     | Контр. раб. | Защита РГЗ | Зачет |
| <b>ОПК.1</b>          | у1. умеет работать с системными естественнонаучными моделями объектов профессиональной деятельности            | +              |             |            | +     |
| <b>ОПК.9</b>          | у11. умеет пользоваться наиболее распространенными офисными и математическими пакетами прикладных программ     | +              | +           | +          | +     |
| <b>ПК.3</b>           | з1. методы моделирования приборов и устройств вакуумной, плазменной, твердотельной, микроволновой электроники; |                |             |            | +     |

Фонд оценочных средств по дисциплине представлен в приложении № 1 к рабочей программе.

## 7. Литература

### Основная литература

1. ЭБС IPRbooks [Электронный ресурс] : электронно-библиотечная система. - [Россия], 2010. - Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/>. - Загл. с экрана.
2. Абрамов И. И. Лекции по моделированию элементов интегральных схем / И. И. Абрамов. - М. ;, 2005. - 148 с. : ил.
3. Драгунов В. П. Наноструктуры: физика, технология, применение : учебное пособие / В. П. Драгунов, И. Г. Неизвестный ; Новосиб. гос. техн. ун-т. - Новосибирск, 2010. - 354, [1] с. : ил.

### Дополнительная литература

1. Польский Б. С. Численное моделирование полупроводниковых приборов / Б. С. Польский. - Рига, 1986. - 168 с. : ил., схемы
2. Мулярчик С. Г. Численное моделирование микроэлектронных структур : [монография] / С. Г. Мулярчик. - Минск, 1989. - 367, [1] с. : табл., схемы
3. Автоматизация проектирования БИС. В 6 кн.. Кн. 5 : [практическое пособие] / под ред. Г. Г. Казеннова. - М., 1990. - 143, [1] с. : ил., табл.
4. Моделирование полупроводниковых приборов и технологических процессов : Последние достижения / под ред. Д. Миллера; пер. с англ. М. С. Обрехта, под ред. Г. В. Гадияка. - М., 1989. - 277, [1] с.
5. МОП-СБИС. Моделирование элементов и технологических процессов : [сборник лекций] / под ред. П. Антонетти, Д. Антониадиса, Р. Даттона, У. Оулдхема ; пер. с англ. В. Л. Кустова, В. М. Петрова, О. В. Селляховой ; под ред. Р. А. Суриса. - М., 1988. - 495, [1] с. : ил.

6. Бубенников А. Н. Моделирование интегральных микротехнологий, приборов и схем : Учеб. пособие для вузов по спец. "Физика и технология материалов и компонентов электрон. техники". - М., 1989. - 319, [1] с. : ил.
7. Абрамов И. И. Численное моделирование элементов интегральных схем / И. И. Абрамов, В. В. Харитонов ; под ред. А. Г. Шашкова. - Минск, 1990. - 223, [1] с. : ил., схемы

#### *Интернет-ресурсы*

1. ЭБС НГТУ : <http://elibrary.nstu.ru/>
2. ЭБС «Издательство Лань» : <https://e.lanbook.com/>
3. ЭБС IPRbooks : <http://www.iprbookshop.ru/>
4. ЭБС "Znanium.com" : <http://znanium.com/>
5. :

### **8. Методическое и программное обеспечение**

#### *8.1 Методическое обеспечение*

1. Моделирование нанотранзисторов в TCAD SENTAUROS : методическое руководство к лабораторному практикуму для 4 курса РЭФ дневного отделения / Новосиб. гос. техн. ун-т ; [сост.: С. В. Калинин и др.]. - Новосибирск, 2010. - 103 с. : ил., табл.. - Режим доступа: [http://elibrary.nstu.ru/source?bib\\_id=vtls000146909](http://elibrary.nstu.ru/source?bib_id=vtls000146909)

#### *8.2 Специализированное программное обеспечение*

- 1 Microsoft Office
- 2 TCAD Sentaurus
- 3 Microsoft Windows

### **9. Материально-техническое обеспечение**

Компьютерный класс

| № | Наименование                                                                      | Назначение                                     |
|---|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| 1 | Компьютерный класс (Компьютеры объединены в локальную сеть с выходом в Internet ) | Используется для проведения лабораторных работ |

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

Кафедра полупроводниковых приборов и микроэлектроники

“УТВЕРЖДАЮ”  
ДЕКАН РЭФ  
д.т.н., профессор В.А. Хрусталеv  
“    ”    \_\_\_\_\_    г.

## ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ

### УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

#### **Математическое моделирование электронных систем**

Образовательная программа: 11.03.04 Электроника и микроэлектроника, профиль:  
Микроэлектроника и микроэлектроника

# 1. Обобщенная структура фонда оценочных средств учебной дисциплины

Обобщенная структура фонда оценочных средств по дисциплине **Математическое моделирование электронных систем** приведена в Таблице.

Таблица

| Формируемые компетенции                                                                                                                                                         | Показатели сформированности компетенций (знания, умения, навыки)                                    | Темы                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | Этапы оценки компетенций                                      |                                                                                                                                                                                                                                        |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                                                                                                 |                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | Мероприятия текущего контроля (курсовой проект, РГЗ(Р) и др.) | Промежуточная аттестация (экзамен, зачет)                                                                                                                                                                                              |
| ОПК.1 способность представлять адекватную современному уровню знаний научную картину мира на основе знания основных положений, законов и методов естественных наук и математики | у1. умеет работать с системными естественнонаучными моделями объектов профессиональной деятельности | Дидактическая единица:1 Общие вопросы наноэлементов и наносистем 1.1 Общие вопросы наноэлементов и наносистем 1.1 Элементная база современной микро и наноэлектроники и микросистемной техники 1.2 Математические модели для наноэлектроники Дидактическая единица:2 Основные особенности TCAD-моделирования 2.1 Моделирование технологических параметров нанопереходов на базе основных оболочек и подсистем TCAD SenTaurus 2.2 Основные особенности TCAD-моделирования 2.3 Приборно-технологическое моделирование Дидактическая единица:3 Моделирование технологических процессов в TCAD SenTaurus 3.2 Технологическое моделирование двумерной структуры МОПТ на напряженном кремнии 3.3 Моделирование технологических процессов в TCAD SenTaurus 3.3 Сквозное моделирование электрофизических характеристик кремниевых полупроводниковых структур в TCAD SenTaurus 3.5 Модели ионной имплантации 3.6 Модели термического окисления кремния 3.7 Диффузионные модели 4.4 Основные электрофизические модели Дидактическая единица:4 Электрофизическое моделирование приборов в TCAD SenTaurus 4.4 Моделирование электрофизических параметров и характеристик HEMT-структур в TCAD SenTaurus 4.8 Основные электрофизические модели | Отчеты по лабораторным работам 1-4, контрольная работа, РГЗ   | Зачет, вопросы по темам «Общие вопросы наноэлементов и наносистем», «Основные особенности TCAD-моделирования», «Моделирование технологических процессов в TCAD SenTaurus», «Электрофизическое моделирование приборов в TCAD SenTaurus» |

|                                                                                                                                                                   |                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                             |                                                                                                                                                                                                                                        |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ОПК.9 способность использовать навыки работы с компьютером, владеть методами информационных технологий, соблюдать основные требования информационной безопасности | у11. умеет пользоваться наиболее распространенными офисными и математическими пакетами прикладных программ     | Дидактическая единица:1<br>Общие вопросы наноэлементов и наносистем<br>1.1 Общие вопросы наноэлементов и наносистем<br>1.2 Математические модели для наноэлектроники<br>Дидактическая единица:2<br>Основные особенности TCAD-моделирования 2.1 Моделирование технологических параметров нанопереходов на базе основных оболочек и подсистем TCAD Sentaurus 2.2 Основные особенности TCAD-моделирования 2.4 Структура TCAD Sentaurus<br>Дидактическая единица:3<br>Моделирование технологических процессов в TCAD Sentaurus 3.2 Технологическое моделирование двумерной структуры МОПТ на напряженном кремнии 3.3 Сквозное моделирование электрофизических характеристик кремниевых полупроводниковых структур в TCAD Sentaurus 3.3 Моделирование технологических процессов в TCAD Sentaurus 3.6 Модели термического окисления кремния 3.7 Диффузионные модели 4.4 Основные электрофизические модели<br>Дидактическая единица:4<br>Электрофизическое моделирование приборов в TCAD Sentaurus 4.4 Моделирование электрофизических параметров и характеристик HEMT-структур в TCAD Sentaurus 4.8 Основные электрофизические модели | Отчеты по лабораторным работам 1-4, контрольная работа, РГЗ | Зачет, вопросы по темам «Общие вопросы наноэлементов и наносистем», «Основные особенности TCAD-моделирования», «Моделирование технологических процессов в TCAD Sentaurus», «Электрофизическое моделирование приборов в TCAD Sentaurus» |
| ПК.3 готовность анализировать и систематизировать результаты исследований, представлять материалы в виде научных отчетов, публикаций, презентаций                 | з1. методы моделирования приборов и устройств вакуумной, плазменной, твердотельной, микроволновой электроники; | Дидактическая единица:1<br>Общие вопросы наноэлементов и наносистем<br>1.1 Элементная база современной микро и наноэлектроники и микросистемной техники                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Отчеты по лабораторным работам 1-4                          | Зачет, вопросы по темам «Общие вопросы наноэлементов и наносистем», «Электрофизическое моделирование приборов в TCAD Sentaurus»                                                                                                        |

## 2. Методика оценки этапов формирования компетенций в рамках дисциплины.

Промежуточная аттестация по дисциплине проводится в 8 семестре - в форме дифференцированного зачета, который направлен на оценку сформированности компетенций ОПК.1, ОПК.9, ПК.3.

Зачет проводится в устной форме по тематическим карточкам.

Семестровый курс разбит на четыре темы. В каждая тема контролируется с помощью контрольных

карточек, содержащих в себе 5 вопросов, сформулированных в соответствии с прочитанным курсом лекций. При ответе студента за каждый правильный ответ начисляется один балл. Максимально возможное количество баллов, которое можно набрать на зачете не превышает 20.

Кроме того, сформированность компетенций проверяется при проведении мероприятий текущего контроля, указанных в таблице раздела 1.

В 8 семестре обязательным этапом текущей аттестации являются расчетно-графическое задание (работа) (РГЗ(Р)), контрольная работа. Требования к выполнению РГЗ(Р), контрольной работы, состав и правила оценки сформулированы в паспорте РГЗ(Р), контрольной работы.

Общие правила выставления оценки по дисциплине определяются балльно-рейтинговой системой, приведенной в рабочей программе учебной дисциплины.

На основании приведенных далее критериев можно сделать общий вывод о сформированности компетенций ОПК.1, ОПК.9, ПК.3, за которые отвечает дисциплина, на разных уровнях.

### **Общая характеристика уровней освоения компетенций.**

**Ниже порогового.** Уровень выполнения работ не отвечает большинству основных требований, теоретическое содержание курса освоено частично, пробелы могут носить существенный характер, необходимые практические навыки работы с освоенным материалом сформированы не достаточно, большинство предусмотренных программой обучения учебных заданий не выполнены или выполнены с существенными ошибками.

**Пороговый.** Уровень выполнения работ отвечает большинству основных требований, теоретическое содержание курса освоено частично, но пробелы не носят существенного характера, необходимые практические навыки работы с освоенным материалом в основном сформированы, большинство предусмотренных программой обучения учебных заданий выполнено, некоторые виды заданий выполнены с ошибками.

**Базовый.** Уровень выполнения работ отвечает всем основным требованиям, теоретическое содержание курса освоено полностью, без пробелов, некоторые практические навыки работы с освоенным материалом сформированы недостаточно, все предусмотренные программой обучения учебные задания выполнены, качество выполнения ни одного из них не оценено минимальным числом баллов, некоторые из выполненных заданий, возможно, содержат ошибки.

**Продвинутый.** Уровень выполнения работ отвечает всем требованиям, теоретическое содержание курса освоено полностью, без пробелов, необходимые практические навыки работы с освоенным материалом сформированы, все предусмотренные программой обучения учебные задания выполнены, качество их выполнения оценено числом баллов, близким к максимальному.



## Паспорт зачета

по дисциплине «Математическое моделирование электронных систем», 8 семестр

### 1. Методика оценки

Зачет проводится в устной форме, по билетам. Билет формируется по следующему правилу:

первый вопрос выбирается из диапазона вопросов первой темы (см. список вопросов ниже), второй вопрос из диапазона вопросов 2 темы.

В ходе зачета преподаватель вправе задавать студенту дополнительные уточняющие вопросы по конспекту лекций.

### Форма билета для зачета

НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
Факультет РЭФ

#### Билет № 1\_

к зачету по дисциплине «Математическое моделирование электронных систем»

---

1. Классификационная схема математических моделей.
2. Схема сквозного TCAD-моделирования

Утверждаю: зав. кафедрой \_\_\_\_\_ проф. Гайслер В.А.  
(подпись)

(дата)

### 2. Критерии оценки

- Ответ на контрольные карточки для зачета считается **неудовлетворительным**, если студент при ответе на вопросы не дает определений основных понятий, не способен показать причинно-следственные связи явлений, допускает принципиальные ошибки, оценка составляет менее 10 контрольных баллов зачета.
- Ответ на контрольные карточки для зачета засчитывается на **пороговом** уровне, если студент при ответе на вопросы дает определение основных понятий, может показать причинно-следственные связи явлений, допускает не принципиальные ошибки, оценка составляет 10-12 контрольных баллов зачета.
- Ответ на контрольные карточки для зачета засчитывается на **базовом** уровне, если студент при ответе на вопросы формулирует основные понятия, законы, дает

характеристику процессов, явлений, проводит анализ причин, условий, может представить качественные характеристики процессов, не допускает ошибок при в процессе вычислений, оценка составляет 13-17 контрольных баллов зачета.

- Ответ на контрольные карточки для зачета билет засчитывается на **продвинутом** уровне, если студент при ответе на вопросы проводит сравнительный анализ подходов, проводит комплексный анализ, выявляет проблемы, предлагает механизмы решения, способен представить количественные характеристики определенных процессов, приводит конкретные примеры из практики, оценка составляет 18-20 контрольных баллов зачета.

### **3. Шкала оценки**

Зачет считается сданным, если средняя сумма баллов по всем вопросам составляет не менее 10 баллов (по 20 балльной шкале).

Коэффициент, с которым учитывается полученная сумма баллов в общей оценке по дисциплине, определяется Правилами аттестации (балльно-рейтинговой системы) исходя из того, что максимальное количество баллов за зачет не может превышать 20 баллов.

### **4. Вопросы к зачету по дисциплине «Математическое моделирование электронных систем»**

#### «Общие вопросы»

- 1.1 Нанотехнологии, наноэлементы и наносистемы
- 1.2 Элементная база современной микро и наноэлектроники
- 1.3 Миниатюризация и ее влияние на параметры КМОПТ
- 1.4 Физические эффекты, связанные с процессом миниатюризации
- 1.5 Технологические способы подавления паразитных эффектов в КМОПТ: ретроградный карман, LDD, HALO и КНИ структуры
- 1.6 Схема Даттона для математических моделей наноэлектроники
- 1.7 Иерархия транспортных моделей в наноэлектронике
- 1.8 Взаимосвязь между транспортными механизмами и характерной длиной нанoeлемента
- 1.9 Классификационная схема математических моделей

#### «Основные особенности TCAD-моделирования»

- 2.1 Общая характеристика метода приборно-технологического моделирования и его возможности
- 2.2 Схема сквозного TCAD-моделирования
- 2.3 Общая структура TCAD SenTaurus
- 2.4 Входные/ выходные файлы основных приложений TCAD SenTaurus
- 2.5 Основные схемы моделирования в TCAD SenTaurus
- 2.6 Общая структура командного файла для SProcess
- 2.7 Общая структура командного файла для SDevice

#### «Моделирование технологических процессов в TCAD SenTaurus»

- 3.1 Основные особенности моделирования процесса ионной имплантации(ИИ).
- 3.2 Системы координат, используемые для моделирования процесса ИИ
- 3.3 Основные модельные параметры имплантационных профилей легирования.
- 3.4 Общая характеристика метода Монте-Карло при моделировании ИИ
- 3.5 Аппроксимационные модели ИИ. Модель Гаусса.
- 3.6 Аппроксимационные модели ИИ. Модель Пирсон-IV
- 3.7 Двумерное моделирование бокового распределения ионов ИИ
- 3.8 Основные физические процессы при термическом окислении кремния
- 3.9 Модели Дила-Гроува и Массауда для процесса термического окисления
- 3.10 Вариативность команды , моделирующей процесс термического окисления в приложении SProcess
- 3.11 Концентрационные модели коэффициента диффузии. Модель эффективного коэффициента диффузии
- 3.12 Диффузионные модели в TCAD SenTaurus. Модель с постоянным уровнем Ферми
- 3.13 Диффузионные модели в TCAD SenTaurus. Трехпоточковая модель
- 3.14 Диффузионные модели в TCAD SenTaurus. Пятипоточковая модель

«Электрофизическое моделирование приборов в TCAD SenTaurus»

- 4.1 Исходные данные для электрофизического моделирования в SDevice
- 4.2 DD модель и краевые условия в диффузионно-дрейфовой модели полупроводникового прибора.
- 4.3 Термодинамическая модель полупроводникового прибора в приложении «SDevice».
- 4.4 Гидродинамическая модель полупроводникового прибора в приложении «SDevice».

Вопросы составил \_\_\_\_\_ доц. Калинин С.В. декабрь 20\_\_

## Паспорт контрольной работы

по дисциплине «Математическое моделирование электронных систем», 8 семестр

### 1. Методика оценки

Контрольная работа проводится по темам, изученным в течение 1 семестра, включает 8 заданий. Выполняется письменно.

### 2. Критерии оценки

Каждое задание контрольной работы оценивается в соответствии с приведенными ниже критериями.

Каждое задание контрольной работы оценивается в соответствии с приведенными ниже критериями. Каждое правильно выполненное задание оценивается 1 баллом. Контрольная работа считается **невыполненной**, если выполнено менее 50% заданий. Оценка составляет 0-4 баллов.

Работа выполнена на **пороговом** уровне, если выполнено 50-60% заданий. Оценка составляет 5-6 баллов.

Работа выполнена на **базовом** уровне, если выполнено 70-80% заданий. Оценка составляет 7-8 баллов.

Работа считается выполненной на **продвинутом** уровне, если выполнено не менее 90% заданий. Оценка составляет 9-10 баллов.

### 3. Шкала оценки

В общей оценке по дисциплине баллы за контрольную работу учитываются в соответствии с правилами балльно-рейтинговой системы, приведенными в рабочей программе дисциплины.

### 4. Пример варианта контрольной работы

1. В соответствии с заданием преподавателя выбрать один из вариантов контрольной работы

| № варианта | подложка    | ИЛ бора                                                        | Термический отжиг                                                        | Примечание             |
|------------|-------------|----------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|------------------------|
| 1          | КЭФ-1 (100) | Доза[мкКл/см <sup>2</sup> ) 60 112 180<br>Энергия (кэВ) 50 100 | Атмосфера:<br>O <sub>2</sub> -100% N <sub>2</sub> -0%<br>T=1150° t=1 час | Модель ИЛ<br>pearson   |
| 2          | КЭФ-1 (100) | Доза[мкКл/см <sup>2</sup> ) 60 112 180<br>Энергия (кэВ) 50 100 | Атмосфера:<br>O <sub>2</sub> -10% N <sub>2</sub> -90%<br>T=1150° t=1 час | Модель ИЛ<br>pearson.s |
| 3          | КЭФ-1 (100) | Доза[мкКл/см <sup>2</sup> ) 60 112 180<br>Энергия (кэВ) 50 100 | Атмосфера:<br>O <sub>2</sub> -1% N <sub>2</sub> -99%<br>T=1150° t=1 час  | Модель ИЛ<br>gaussian  |
| 4          | КЭФ-1 (100) | Доза[мкКл/см <sup>2</sup> ) 60 112 180<br>Энергия (кэВ) 50 100 | Атмосфера:<br>O <sub>2</sub> -0% N <sub>2</sub> -110%<br>T=1150° t=1 час | Модель ИЛ<br>pearson   |
| 5          | КЭФ-1 (111) | Доза[мкКл/см <sup>2</sup> ) 60 112 180<br>Энергия (кэВ) 50 100 | Атмосфера:<br>O <sub>2</sub> -100% N <sub>2</sub> -0%<br>T=1150° t=1 час | Модель ИЛ<br>pearson   |
| 6          | КЭФ-1 (111) | Доза[мкКл/см <sup>2</sup> ) 60 112 180<br>Энергия (кэВ) 50 100 | Атмосфера:<br>O <sub>2</sub> -100% N <sub>2</sub> -0%<br>T=1150° t=1 час | Модель ИЛ<br>pearson.s |

|   |             |                                                                |                                                |                       |
|---|-------------|----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|-----------------------|
| 7 | КЭФ-1 (111) | Доза[мкКл/см <sup>2</sup> ) 60 112 180<br>Энергия (кэВ) 50 100 | Атмосфера:<br>O2–100% N2-0%<br>T=1150° t=1 час | Модель ИЛ<br>gaussian |
| 8 | КЭФ-1 (111) | Доза[мкКл/см <sup>2</sup> ) 60 112 180<br>Энергия (кэВ) 50 100 | Атмосфера:<br>O2–100% N2-0%<br>T=1150° t=1 час | Модель ИЛ<br>pearson  |

2. В оболочке *SWB* создать директорию для расчетов и текущий проект.

3. Создать план вычислительного эксперимента и вычислительный поток для расчета технологических характеристик:

$R_s$ (Доза, Энергия);  $X_j$ (Доза, Энергия) (в виде таблицы значений)

и профилей легирования  $p$ - $n$  переходов.

4. Графики профилей легирования записать на флешку и предъявить преподавателю для демонстрации на контрольном компьютере.

5. Дополнить вычислительный поток элементами , необходимыми для нахождения ВАХ  $p$ - $n$ -переходов в случае  $D=112$   $E=50$

6. Рассчитать прямую и обратную ВАХ  $p$ - $n$  перехода и записать графики на флешку и предъявить преподавателю для демонстрации на контрольном компьютере.

Примечание:

Критерием выполнения работы являются:

а) Таблицы (графики) зависимостей  $R_s$ (Доза, Энергия);  $X_j$ (Доза, Энергия);

б) Графики семейства (доза-энергия) профилей легирования;

в) Графики прямой и обратной ВАХ смоделированного  $p$ - $n$ -перехода.

## Паспорт расчетно-графического задания (работы)

по дисциплине «Математическое моделирование электронных систем», 8 семестр

### 1. Методика оценки

В рамках расчетно-графического задания (работы) по дисциплине студенты должны рассчитать параметры транзистора с управляющим р-п-переходом в соответствии с исходными данными.

При выполнении расчетно-графического задания (работы) студенты должны следовать, используя исходные данные, подобрать толщину эпитаксиальной пленки и глубину залегания р-п-перехода так, чтобы напряжение отсечки было в пределах  $(-2 - 4) В$ .

При формировании структуры транзистора необходимо предусмотреть достаточное расстояние между сильно легированными диффузионными областями затвора и истоков стоков для предотвращения их смыкания.

Обязательными структурными частями РГЗ являются:

- краткое описание проектируемой структуры с поясняющими рисунками и обоснованным выбором дополнительных геометрических и физических параметров, необходимых для двумерного моделирования транзистора;
- входной командный файл для приложения SProcess, обеспечивающий расчет структуры транзистора;
- одномерные профили легирования, обеспечивающие геометрические параметры транзистора в соответствии с вариантом расчета;
- входной командный файл для приложения SDevice, обеспечивающий расчет напряжения отсечки

### 2. Критерии оценки

- Работа считается **не выполненной**, если выполнены не все части РГЗ(Р), отсутствует анализ проекта для моделирования, некорректно сформирована структура и не обеспечено в процессе моделирования требуемое напряжение отсечки. Оценка в этом случае составляет 0-4 баллов.
- Работа считается выполненной **на пороговом** уровне, если части РГЗ(Р) выполнены формально: нет анализа проекта для моделирования, не обеспечено требуемое напряжение отсечки, анализ объекта выполнен без декомпозиции, диагностические признаки недостаточно обоснованы, аппаратные средства не соответствуют современным требованиям. Оценка в этом случае составляет 5-6 баллов.
- Работа считается выполненной **на базовом** уровне, если моделирование транзистора в целом выполнено, но не обеспечено требуемое напряжение отсечки. Оценка в этом случае составляет 7-8 баллов.
- Работа считается выполненной **на продвинутом** уровне, если моделирование транзистора выполнено в полном объеме и получено оптимальное значение порогового напряжения. Оценка в этом случае составляет 9-10 баллов.

### 3. Шкала оценки

В общей оценке по дисциплине баллы за РГЗ(Р) учитываются в соответствии с правилами балльно-рейтинговой системы, приведенными в рабочей программе дисциплины.

#### 4. Примерный перечень тем РГЗ(Р)

##### Варианты ПТУП

| № варианта | Исток-сток               |                      | Канал                 |                 |                 | Затвор                   |                   | Подложка              |
|------------|--------------------------|----------------------|-----------------------|-----------------|-----------------|--------------------------|-------------------|-----------------------|
|            | $N_{D0}, \text{см}^{-3}$ | $Y_{SD}, \text{мкм}$ | $N_D, \text{см}^{-3}$ | $d, \text{мкм}$ | $L, \text{мкм}$ | $N_{A0}, \text{см}^{-3}$ | $Y_G, \text{мкм}$ | $N_A, \text{см}^{-3}$ |
| 1          | 2e19                     | 0,3                  | 1e16                  | 1,4             | 5,0             | 8e18                     | 0,5               | 9e14                  |
| 2          | 5e19                     | 0,2                  | 2e16                  | 1,2             | 3,0             | 7e18                     | 0,4               | 8e14                  |
| 3          | 4e19                     | 0,2                  | 3e16                  | 1,2             | 1,0             | 9e18                     | 0,5               | 7e14                  |
| 4          | 1e19                     | 0,3                  | 2e16                  | 1,6             | 2,0             | 1e19                     | 0,6               | 6e14                  |
| 5          | 3e19                     | 0,5                  | 3e16                  | 1,4             | 4,0             | 6e18                     | 0,6               | 1e15                  |
| 6          | 6e18                     | 0,4                  | 1e16                  | 1,6             | 2,0             | 3e18                     | 0,6               | 7e14                  |
| 7          | 5e18                     | 0,5                  | 5e16                  | 2,0             | 1,0             | 1e18                     | 0,7               | 6e14                  |
| 8          | 9e18                     | 0,4                  | 4e16                  | 1,8             | 5,0             | 4e18                     | 0,7               | 9e14                  |
| 9          | 7e18                     | 0,6                  | 4e16                  | 1,8             | 3,0             | 5e18                     | 0,7               | 8e14                  |
| 10         | 8e18                     | 0,6                  | 5e16                  | 2,0             | 4,0             | 2e18                     | 0,8               | 1e15                  |

$N_{D0}$  – максимальная концентрация доноров в исток-стоках;  $Y_{SD}$  – глубина залегания исток-стоковых  $p$ - $n$ -переходов;  $N_D$  – концентрация доноров в канале;  $d$  – толщина эпитаксиальной пленки;  $L$  – длина затвора;  $N_{A0}$  – максимальная концентрация акцепторов в затворе;  $Y_G$  – глубина залегания  $p$ - $n$ -перехода затвора;  $N_A$  – концентрация акцепторов в подложке.

Обычная структура полевого  $n$ -канального транзистора с управляющим  $p$ - $n$ -переходом (ПТУП), используемая в РГЗ представлена на рисунке.

