

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

**ПРИБОРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ
ПРОЕКТИРОВАНИЕ
ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЫ
МОЩНОЙ СВЧ-ЭЛЕКТРОНИКИ**

Учебно-методическое пособие

Воронеж
Издательский дом ВГУ
2016

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|----|
| 1. Дискретная элементная база современной мощной СВЧ-электроники | 4 |
| 1.1. Обзор дискретной элементной базы современной мощной СВЧ-электроники | 4 |
| 1.2. Классификация моделей мощных СВЧ-транзисторов..... | 7 |
| 2. Приборно-технологическая САПР TCAD для моделирования дискретной электронной компонентной базы | 10 |
| 2.1. Состав приборно-технологической САПР TCAD..... | 10 |
| 2.2. Оптимизаторы расчетной сетки MDRAW и MESH | 11 |
| 2.3. Программный модуль для моделирования технологических процессов микроэлектроники | 15 |
| 2.4. Программный модуль для моделирования структуры полупроводниковых приборов | 23 |
| 2.5. Программный модуль для моделирования электрофизических параметров полупроводниковых структур | 25 |
| 2.6. Визуализация результатов численных экспериментов | 34 |
| 3. Приборно-технологическое проектирование LDMOS-структур..... | 38 |
| 3.1. Конструкция и технология LDMOS-структур..... | 38 |
| 3.2. Проектирование технологии создания LDMOS-структур | 39 |
| 3.2.1 Моделирование технологии создания LDMOS-структур | 39 |
| 3.2.2. Приборно-технологическая модель LDMOS-транзистора в DIOS..... | 43 |
| 3.2.3. Создание металлических контактов в модуле DEVISE | 47 |
| 3.2.4. Оптимизация сетки в модуле MESH | 49 |
| 3.3. Расчет электрофизических параметров LDMOS-структур | 53 |
| 3.3.1. Модели, используемые для расчета электрофизических параметров | 53 |
| 3.3.2. Расчет переходной вольт-амперной характеристики | 56 |
| 3.3.4. Расчет сопротивления сток-исток в открытом состоянии | 60 |
| 3.3.5. Расчет напряжения пробоя сток-исток | 62 |
| 3.3.5. Расчет межэлектродных емкостей | 65 |
| Библиографический список | 68 |

Т а б л и ц а 1.2

Российские компании, производящие мощные СВЧ транзисторы [1]

| Компания | Город | Тип продукции |
|------------------------|-------------|--|
| «ВЗПП-Сборка» | Воронеж | Si биполярные транзисторы ($P_{out} = 2\text{--}500$ Вт, $f = 50\text{--}1000$ МГц) |
| «ГЗ “Пульсар”» | Москва | Si биполярные транзисторы ($P_{out} = 0,1\text{--}500$ Вт, f до 8 ГГц) |
| «Исток» | Фрязино | GaN полевые транзисторы (P_{out} до 2 Вт, $f = 1\text{--}40$ ГГц) |
| НИИПП | Томск | GaAs полевые транзисторы с барьером Шоттки (f до 4 ГГц) СВЧ-диоды Ганна (P_{out} более 100 мВт, $f = 4\text{--}150$ ГГц) СВЧ GaAs диоды Шоттки (f до 178 ГГц) |
| НИИЭТ | Воронеж | Si биполярные транзисторы ($P_{out} = 0,5\text{--}500$ Вт, $f = 100\text{--}1090$ МГц) Si MOSFET, LDMOS-транзисторы ($P_{out} = 5\text{--}600$ Вт, $f = 30\text{--}1000$ МГц) СВЧ-модули |
| «НПП «Пульсар» | Москва | Si биполярные транзисторы ($P_{out} = 2,5\text{--}150$ Вт, $f = 1,2\text{--}3,1$ ГГц) Si LDMOS-транзисторы ($P_{out} = 5\text{--}200$ Вт, $f = 0,4\text{--}2$ ГГц) СВЧ-модули |
| «НПП “Планета-Аргалл”» | В. Новгород | GaN полевые транзисторы ($P_{out} = 15\text{--}500$ мВт, $f = 0,1\text{--}40$ ГГц) |
| «ВЗПП-Сборка» | Воронеж | Si биполярные транзисторы |
| «ГЗ “Пульсар”» | Москва | Si биполярные транзисторы |
| «Исток» | Фрязино | GaN полевые транзисторы |
| НИИПП | Томск | GaAs полевые транзисторы с барьером Шоттки СВЧ-диоды Ганна СВЧ GaAs диоды Шоттки |
| НИИЭТ | Воронеж | Si биполярные транзисторы Si MOSFET, LDMOS-транзисторы СВЧ-модули |
| «НПП “Пульсар”» | Москва | Si биполярные транзисторы Si LDMOS-транзисторы СВЧ-модули |
| «НПП “Планета-Аргалл”» | В. Новгород | GaN полевые транзисторы |

Однако, трудности получения на основе новых материалов качественных подложек с прецизионными характеристиками, разработки и внедрения нового технологического оборудования сдерживают развитие этих направлений.

Очевидными становятся преимущества кремниевой технологии в реализации компонентной базы мощной СВЧ-электроники [8]:

- невысокая стоимость кремниевых подложек;
 - отработанность технологических процессов с размерами активных областей менее 100 нм;
 - достаточно высокий коэффициент усиления;
 - высокая выходная мощность за счет запараллеливания транзисторных структур;
 - стабильность работы при рассогласовании
- и т. д.

Благодаря этому кремний является одним из наиболее благоприятных материалов по эффективной мощности в диапазоне 100÷2000 МГц, а кремниевые биполярные и полевые транзисторы занимают существенную долю рынка для гражданских и военных радарных систем, систем радио- и телепередающей аппаратуры, систем мобильной и стационарной связи в диапазоне до 2 ГГц.

1.2. Классификация моделей мощных СВЧ-транзисторов

В основе классификации моделей полупроводниковых приборов, в том числе и компонентной базы СВЧ-электроники (рис. 1.2), лежит степень абстракции моделей [5], которая определяет возможность их использования на различных уровнях моделирования с использованием современных САПР [12–17].



Рис. 1.2. Классификация моделей компонентной базы СВЧ-электроники [5]

Физико-технологические модели, описывающие с помощью систем линейных и нелинейных дифференциальных уравнений в частных производ-

ных происходящие в активных областях приборов физические процессы и явления: распределение заряда, перенос носителей заряда, непрерывность тока, квантово-механические эффекты и т. д. Применение сложных алгоритмов решения, таких как метод конечных разностей и метод конечных элементов, диктует необходимость использования пакетов приборно-технологического моделирования различных фирм: Sentaurus (ISE TCAD) (фирма Synopsys [15]), Silvaco (фирма Silvaco [14]), Microtec (фирма Siborg System Inc. [13]).

Физико-технологическое моделирование успешно применяется в технологическом цикле проектирования новых СВЧ-транзисторов, что позволяет добиваться требуемых параметров и характеристик на постоянном и переменном токе, изменяя физические свойства и геометрические размеры приборов.

Компактные, или структурные, модели, реализующие расчет радио-электронных устройств на уровне электрических схем. Эти модели отражают внутреннюю структуру и физические особенности исходного СВЧ-прибора: на электрическом уровне описываются свойства активной структуры (сопротивления и емкости р–п-переходов, усилительные свойства и т. д.), а также паразитные емкости и индуктивности соединительных выводов, которые зависят от геометрических, технологических и других переменных.

Различают две разновидности компактных моделей:

- компактные электрические модели, описывающие зависимости параметров прибора только от электрических переменных (например, напряжений на выводах транзистора);
- компактные физические модели, отражающие зависимости параметров прибора и от физических (технологических, геометрических и т. д.) переменных.

При этом рассматриваются модели *линейные* (малосигнальные) и *нелинейные*.

Линейная (малосигнальная) модель описывает поведение транзистора для одного (заданного) режима по постоянному току в предположении, что изменения переменного тока и напряжения в окрестности рабочей точки относительно небольшие, и элементы линейной модели не зависят от амплитуды входного переменного напряжения и от частоты.

Параметры элементов электрических схем в нелинейных моделях являются функциями напряжений, температуры и т. д. Эти зависимости аппроксимируются заранее выбранными аналитическими функциями, полученными или из физических представлений о работе прибора, или путем экспертного подбора соответствующего вида математических функций.

Поведенческие модели, построенные на основе формального сходства между поведением модели и объекта относительно внешних выводов. При

моделировании СВЧ-транзисторов наиболее простой поведенческой моделью являются малосигнальные параметры транзистора как четырехполюсника – S -параметры. В этом случае СВЧ-транзистор (нелинейный прибор) в некотором диапазоне установившегося режима на заданной частоте заменяется линейным эквивалентным четырехполюсником. При работе в нелинейном режиме используются большесигнальные S -параметры.

Аппаратные модели, построенные в виде специализированного устройства, в котором информация о модели отражена в структуре электрических связей между его электрическими блоками. Данный тип моделей при разработке СВЧ-устройств практически не применяется.


2. ПРИБОРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ САПР TCAD ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИСКРЕТНОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ КОМПОНЕНТНОЙ БАЗЫ

2.1. Состав приборно-технологической САПР TCAD

САПР ISE TCAD (Sentaurus) [4, 9, 12, 17] предназначена для комплексного моделирования процесса разработки и оптимизации полупроводниковых технологий микро- и нанoeлектроники. САПР ISE TCAD ориентирована на проектирование элементной компонентной базы и позволяет осуществлять сквозное моделирование как дискретных полупроводниковых приборов, так и интегральных полупроводниковых структур, обеспечивая расчет полного технологического маршрута изготовления полупроводникового прибора и последующий анализ статических, динамических и частотных электрических характеристик приборов в одно-, двух- или трехмерном приближении.

Моделирование технологии и электрофизических параметров электронной компонентной базы основано на фундаментальных уравнениях физики, решаемых методом конечных разностей с использованием расчетных сеток с адаптивным шагом.

Для организации проектов моделирования, управления другими компонентами САПР, в том числе для запуска процесса моделирования предназначена программа-оболочка **GENESIS** с графическим пользовательским интерфейсом (рис. 2.1). Физико-технологическое моделирование полупроводниковых приборов реализуется с помощью программных модулей **DIOS**, **FLOOPS**. Для того чтобы абстрагироваться от физики конкретных технологических процессов и рассмотреть идеализированную модель, может быть использован модуль структурного моделирования **DEVISE**. Для оптимизации сетки, построенной при моделировании структуры, используется модуль **MESH**. Визуальное отображение и обработка результатов моделирования полупроводниковых структур выполняется с привлечением программ **TECPLOT**, **INSPECT**.

Менеджер проектов содержит список ранее созданных проектов. Для создания нового проекта нужно на панели меню выбрать *file- > new- > new project* или на панели инструментов кликнуть мышкой по значку . После этого появится пустое окно **GENESIS**.

В рабочее пространство нового проекта необходимо добавить программы-компоненты САПР, для которых в дальнейшем создаются командные файлы. Для добавления программных модулей в проект нужно правой кнопкой мыши щелкнуть на надписи *No Tools*. В появившемся меню выбрать пункт *Add*, в запустившемся диалоговом блоке нажать на кнопку *Tools* и выбрать из набора пиктограмм требуемый модуль САПР TCAD.