

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессио-
нального образования

Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники

Д.Д. Зыков, К.Ю. Осипов

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ
ЭЛЕКТРОННОЙ КОМПОНЕНТНОЙ БАЗЫ.
ОСНОВЫ САПР SYNOPSYS TCAD**

2012

Рецензент:

Заведующий кафедрой физической электроники Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, д-р техн. наук, профессор П.Е. Троян

© Д.Д. Зыков, К.Ю. Осипов, 2012

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
1. Приборно-технологическое моделирование (TCAD)	4
2. Описание Synopsys TCAD	7
3. Виртуальное производство с использованием Synopsys TCAD	13
4. Возможности Synopsys TCAD для физического моделирования полупроводниковых светодиодов	15
4.1. Моделирование квантовых ям	15
4.2. Одномерное стационарное уравнение Шредингера	16
4.3. <i>k</i> p-метод	16
4.4. Взаимосвязь электрической и оптической моделей	18
4.5. Выводы.....	19
5. Работа с модулями Synopsys TCAD	19
5.1. Sentaurus Process.....	20
5.1.1. Задание начальной двухмерной сетки	21
5.1.2. Область моделирования и инициализация	21
5.1.3. Ионная имплантация	22
5.1.4. Выращивание подзатворного окисла.....	22
5.1.5. Создание поликремниевого затвора	22
5.1.6. Работа с масками	23
5.1.7. Окисление поликремния	23
5.1.8. Контактные площадки.....	25
5.1.9. Сохранение всей структуры	25
5.1.10. Сохранение одномерных разрезов	26
5.2. Sentaurus Device.....	27
5.2.1. Входной командный файл Sentaurus Device	27
5.2.1.1. Секция File	28
5.2.1.2. Секция Electrode	31
5.2.1.3. Секция Physics	32
5.2.1.4. Секция Plot	33
5.2.1.5. Секция Math	33
5.2.1.6. Секция Solve	34
5.2.2. Запуск Sentaurus Device.....	35
5.2.3. Результаты расчета	35
5.3. Sentaurus Inspect	36
5.3.1. Запуск Inspect	36
5.3.2. Загрузка наборов данных	37
5.3.2.1. Форматы файлов	37
5.3.2.2. Загрузка	38
5.3.3. Отображение наборов данных.....	39
5.4. Sentaurus Workbench	40
5.4.1. Запуск Sentaurus Workbench	41
5.4.2. Запуск проектов	43
5.4.3. Отображение результатов	45
5.4.4. Выбор узлов	46

5.4.5. Удаление проектов	46
5.4.6. Создание проектов.....	47
5.4.6.1. Создание маршрута модулей.....	47
5.4.6.2. Сохранение проектов	50
5.4.7. Выполнение экспериментов	50
5.4.7.1. Добавление параметров	50
5.4.7.2. Создание множества экспериментов	52
5.4.7.3. Предварительная обработка и запуск проектов.....	55
6. Примеры использования Synopsys TCAD	55
6.1. Пример 1. Полупроводниковый резистор на полуизолирующей подложке GaAs.....	55
6.1.1. Создание нового проекта и задание структуры устройства	55
6.1.2. Создание командного файла Sentaurus Device.....	57
6.1.3. Результаты моделирования.....	59
6.2. Пример 2. Диод Шоттки на подложке GaAs	60
6.2.1. Модификация структуры прибора	60
6.2.2. Модификация командного файла Sentaurus Device.....	61
6.2.3. Результаты моделирования.....	62
6.3. Пример 3. Полевой транзистор Шоттки на подложке GaAs.....	63
6.3.1. Модификация командного файла Sentaurus Device.....	63
6.3.2. Результаты моделирования.....	64
6.4. Пример 4. AlGaAs/GaAs транзистор	68
6.4.1. Модификация структуры	69
6.4.2. Модификация командного файла SDevice	69
6.4.3. Результаты моделирования.....	70
Список литературы.....	72
Приложение. Вопросы для самотестирования	73

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящее учебное пособие подготовлено в рамках выполнения проекта ГК «РоснаноТех» «Разработка и апробация программы опережающей профессиональной переподготовки и учебно-методического комплекса (УМК), ориентированных на инвестиционные проекты ГК «РоснаноТех» в области производства конкурентоспособной продукции наноэлектроники на основе наногетероструктурных монокристаллических интегральных схем СВЧ-диапазона длин волн и дискретных полупроводниковых приборов». Пособие предназначено для слушателей программы переподготовки, ориентированных на приобретение компетенций в области новых технологий формирования кремниевых интегральных схем. Целью данного учебного пособия является изучение основ и получение навыков моделирования технологических процессов и приборов с использованием системы автоматизированного проектирования Synopsys TCAD. Исходя из намеченной цели, здесь не делается попытка описать этот комплексный продукт во всем многообразии. В состав указанного пакета входят разные модули для решения одних и тех же задач, и пользователю предоставляются возможности выбора наиболее подходящих и удобных в использовании инструментов. Например, существуют модули Sentaurus Process, DiOS и другие для технологического моделирования, имеющие интерфейс командной строки, а также Ligand, позволяющий с использованием графического интерфейса построить технологический маршрут. В пособии рассмотрен только Sentaurus Process, так как он позиционируется Synopsys как основной инструмент для решения задачи моделирования технологических процессов. Для построения расчетной сетки в пакете также существует несколько разных модулей, но внимание здесь уделено только одному из них. Предлагаемый материал ориентирован на инженеров, обладающих базовыми знаниями по технологии производства и электрофизике полупроводниковых приборов. В качестве основы данного пособия взят учебный материал Synopsys Sentaurus Training.

Подраздел 5.2 и раздел 6 написаны К.Ю. Осиповым, остальная часть пособия и общая редакция выполнены Д.Д. Зыковым.

Объем аудиторных занятий составляет 10 часов, и 10 часов отводится на самостоятельную работу. Слушателям рекомендуется в процессе переподготовки по мере освоения учебного модуля пройти самотестирование по вопросам, сформулированным в приложении к данному пособию.

Д.Д. Зыков, канд. техн. наук, доцент

1. ПРИБОРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ (TCAD)

Приборно-технологическое моделирование, или TCAD (Technology Computer Aided Design), – это область научных знаний и прикладных программных инструментов, позволяющих осуществлять многомерное моделирование интегральных полупроводниковых структур, используя в качестве исходной информации описание технологического процесса их изготовления [1, 2].

Достоинствами TCAD являются универсальность, комплексность проводимых исследований, возможность изучать интегральную структуру в процессе ее формирования, изменять, если потребуется, параметры технологических операций, выбирать оптимальные топологические размеры, места расположения контактов и т.д. В результате использования систем TCAD мы можем не только рассчитывать электрофизические параметры, электрические характеристики интегральных приборов, но и экстрагировать параметры схемотехнических моделей, моделировать работу фрагментов схем, частью которых является, например, прибор, представленный как трехмерная интегральная структура с заданными распределениями примеси и размерами.

Приборно-технологическое моделирование является одним из основных элементов систем автоматизированного проектирования интегральных микросхем. Существует несколько причин, по которым прогресс в области микро- и нанoeлектроники сопровождается усилением роли приборно-технологического моделирования.

В наноразмерных структурах практически нет второстепенных параметров, а с уменьшением размеров элементов усиливается взаимосвязь технологических параметров и электрических характеристик интегральных приборов. Применение экспериментальных методов при исследовании областей в полупроводниковых структурах с размерами порядка 1–10 нм не дает высокой точности результатов, необходимой для надежного прогнозирования приборных характеристик. Нельзя также обойтись только экспериментальными исследованиями при поиске и оптимизации принципиально новых приборных структур и конструктивных решений. Разумной альтернативой в этих случаях является использование численного моделирования. В дополнение к этому проблемой реального производства является сохранение высокого процента выхода годной продукции при уменьшении топологических размеров и повышении сложности изделий. Сокращение этапа запуска в производство достигается с помощью предварительной отладки и оптимизации технологических процессов и конструкций средствами приборно-технологического моделирования. Возможности TCAD позволяют иметь дело с виртуальным производственным процессом. На основе виртуального производства мы можем проводить анализ влияния разброса технологических параметров на приборные и схемотехнические характеристики, выбирать наилучшие решения с точки зрения выхода годных изделий и тем самым работать над повышением технологичности выпускаемых микросхем. Подробнее этот вопрос рассмотрен в разд. 3.

В условиях сокращения жизненного цикла изделий микроэлектроники и конкуренции между их изготовителями сроки и стоимость этапа разработки

новых изделий и технологий имеют определяющее значение. TCAD позволяет в кратчайшие сроки успешно решать проблемы, связанные с разработкой:

- базовых технологических процессов;
- конструкций интегральных элементов;
- проектных топологических норм;
- библиотечных элементов.

Полученные результаты моделирования являются также необходимой частью информации при принятии решений, включая оперативное управление, краткосрочное планирование, анализ бизнеса и стратегий развития.

Современные системы TCAD представляют собой комплекс программных модулей, интерактивных оболочек и средств визуализации, позволяющих решать следующие задачи:

- моделировать отдельные технологические операции, рассчитывать профили распределения примеси, толщины и электрофизические параметры слоев;
- моделировать интегральные структуры, получаемые в результате последовательности технологических операций – технологического маршрута;
- рассчитывать на основе численного моделирования электрические, оптические, электромагнитные и другие характеристики полупроводниковых структур;
- выполнять экстракцию схемотехнических параметров прибора по его электрическим характеристикам, рассчитывать фрагменты схем;
- проводить планирование эксперимента, моделировать прохождение «виртуальной партии» пластин по базовому технологическому маршруту с расщеплением входных технологических параметров (сплит-партии);
- выполнять оптимизацию параметров технологических операций, технологического маршрута, размеров элементов с целью получения заданных характеристик изделия.

В международной технологической дорожной карте для полупроводников (ITRS) существует раздел, посвященный моделированию [3]. На рис. 1.1 представлено начало одной из таблиц ITRS.

Как видно из рисунка, в 2012 г. сокращение стоимости разработки технологии за счет использования TCAD должно достигнуть 37 %, а сокращение времени – 39 %. Это подтверждает значимость роли TCAD в мировой полупроводниковой промышленности.

Возможности приборно-технологического моделирования позволяют исследовать и оптимизировать приборные структуры самых разных типов. Среди новых направлений можно отметить моделирование глубоко субмикронных транзисторных структур с механически напряженным кремнием, анализ шумов в подложке и эффектов взаимного влияния интегральных элементов через подложку в схемах смешанного сигнала и системах-на-кристалле. Поиск оптимальных решений в проектировании технологических маршрутов и приборных структур рассматривается как одно из основных применений приборно-технологического моделирования и разрабатываемых программных пакетов.

Table MS3 Modeling and Simulation Technology Requirements: Accuracy [1] —Near-term Years

Year of Production	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
DRAM ½ Pitch (nm) (contacted)	52	45	40	36	32	28	25	22,5	20,0
MPU/ASIC Metal 1 (M1) ½ Pitch (nm) (contacted)	52	45	40	36	32	28	25	22,5	20,0
MPU Physical Gate Length (nm)	27	24	22	20	18	17	15	14,0	12,8
Estimated technology development cost reduction from use of TCAD (average across best-practice cases reported by industry) [2]	30%	32%	35%	37%	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Estimated technology development time reduction from use of TCAD (average across best-practice cases reported by industry) [2]	32%	34%	37%	39%	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Lithography Modeling									
Absolute CD prediction accuracy (incl. OP effects) for dense and isolated lines – % of actual CD (=printed gate length) [3]	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%
Accuracy of sensitivity of CD vs. relevant technology parameters (dose, defocus, pitch,) [4]	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%
Front End Process Modeling									
General dopant profile accuracy (% of relevant distances like design rules)	20%	20%	20%	20%	20%	20%	20%	20%	20%
Vertical junction depth simulation accuracy (% of physical gate length of node) [5] [6]	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%
Lateral junction depth simulation accuracy: (% of physical gate length of node) [5] [6]	(2.7 nm)	(2.4 nm)	(2.2 nm)	(2.0 nm)	(1.8 nm)	(1.7 nm)	(1.5 nm)	(1.4 nm)	(1.3 nm)
Accuracy of sensitivity of junction depth with respect to implantation and anneal conditions [3]	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%
Total source/drain series resistance (accuracy of activation)	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%
Total source/drain series resistance (accuracy of activation)	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%

Рис. 1.1. Начало таблицы ITRS, посвященной моделированию. Желтый цвет – решение задачи известно, красный – неизвестно

В наше время приборно-технологическое моделирование стало связующим звеном между дизайн-центрами и производством, обеспечивая разработку и проверку их интерфейса, т.е. проектных норм и библиотечных элементов.

Системы TCAD позволяют осуществлять многомерное моделирование интегральных полупроводниковых структур, используя в качестве исходной информации описание технологического процесса их изготовления. Программная среда TCAD реализует концепцию виртуального производства интегральных полупроводниковых структур и обладает широкими возможностями для вовлечения студентов в активный творческий процесс исследований и разработки конструкций наноразмерных интегральных элементов и технологических маршрутов их изготовления.

2. ОПИСАНИЕ SYNOPSYS TCAD

Sentaurus – это платформа TCAD фирмы Synopsys [4]. Объединивший лучшие свойства инструментов проектирования от компаний Synopsys и ISE TCAD, Sentaurus (рис. 2.1) позволяет пользователям решать широкий спектр задач: от создания глубоко субмикронной логики, памяти и цифро-аналоговых приборов до сенсоров, оптоэлектроники и высокочастотной техники [5].

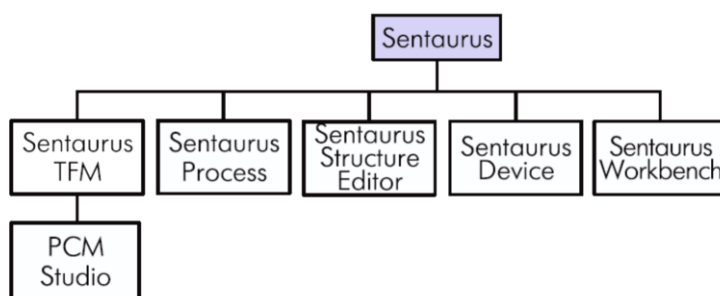


Рис. 2.1. Основные модули Synopsys TCAD

Sentaurus Process

Sentaurus Process – программный модуль для одно-, двух- и трехмерного моделирования процессов производства кремниевых и сложных полупроводников, таких как ионная имплантация, диффузия, окисление, травление и осаждение слоев.

Полное моделирование маршрута КМОП-технологии в 3D

Стремительное развитие новых технологий требует от инженеров понимания физических явлений, происходящих в теле транзистора, для оптимизации его характеристик. Примером может служить расчет механического напряжения в области канала, которое влияет на ток транзистора и требует построения трехмерной модели.

Введение так называемой MGOALS-библиотеки значительно упростило построение такой модели и существенно сократило затраты машинного времени на этот процесс. MGOALS генерирует высококачественную трехмерную сетку, а возможность ослабления критерия Delaunay вблизи границ раздела способствует уменьшению требуемого числа узлов и снижает трудоемкость процесса без ущерба для расчета.

Моделирование механического стресса

Существуют широкие возможности для расчета механического стресса, включая модель рассогласования параметров кристаллической решетки, которая позволяет, например, контролировать напряжения, возникающие в канале SiGe транзистора и влияющие на ток транзистора. Также эта модель учитывает особенности структур на подложках из SiC, GaN, AlGaN.

Для расчета упругих свойств кремния в зависимости от кристаллографического направления используется модель анизотропной упругости. Есть возможность моделирования изгиба пластин.

Для более точного прогнозирования стресса вблизи границ раздела слоев применяются граничные условия Neumann'a, что позволяет моделировать эффекты напряжения в кремнии, вызванные взаимодействием тонких пленок (рис. 2.2).

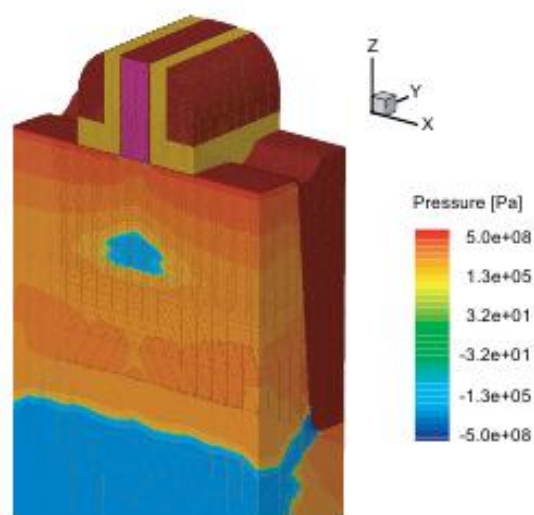


Рис. 2.2. Результаты трехмерного моделирования механического стресса

Исследование диффузии

В моделировании диффузии имеются следующие возможности:

- выбор любого нового набора параметров по желанию пользователей программы;
- пятипоточная модель диффузии и модель междоузельной кластеризации бора;
- уточненные модели дефектообразования и кластеризации, полученные совместно с Университетом Флориды и фирмой FRENDECH.

Все модели диффузии в Sentaurus Process написаны на языке сценариев Alagator и одинаковы для одно-, двух- и трехмерного расчетов. Это означает, что модели примесей, дефектов, окисления и силицидирования так же не трудно изменять, как добавлять новые параметры расчета – примеси и материалы.

Усовершенствованная модель расчета уплотнения осажденного оксида позволяет пользователю задавать процентное изменение его плотности в зависимости от температуры.

Sentaurus Device

Sentaurus Device – это программный модуль для моделирования электрических, термических и оптических характеристик кремниевых и сложных полупроводниковых приборов.

Он позволяет моделировать работу широкого спектра полупроводниковых устройств, включая наноразмерные КМОП-транзисторы, FinFET, КМОП-датчики изображения, флэш-память, крупные мощные транзисторы, SiGe-биполярные гетеротранзисторы, аналоговые/высокочастотные транзисторы, светоизлучающие диоды, лазеры. Кроме того, Sentaurus Device делает возможным анализ и оптимизацию электростатического разряда (ESD), единичного случайного сбоя (SEU) и кратковременной ошибки. Главные особенности Sentaurus Device:

- возможность выбора одно-, двух- и трехмерной геометрии;
- выбор материалов, включая гетеропереходы;
- полный набор реальных транспортных моделей для различного применения (дрейфово-диффузионная, термодинамическая, гидродинамическая, квантовая);
- усовершенствованная модель туннелирования для расчета затворных утечек;
- модели инъекции горячих носителей для решения вопроса надежности приборов;
- расчет оптоэлектроники, включая светодиоды и лазеры;
- набор различных режимов анализа – постоянный ток, переходный процесс, переменный ток, гармонический баланс, смешанная волна;
- действенные численные алгоритмы с беспрецедентной устойчивостью;
- современное программное обеспечение, позволяющее простое внедрение новых моделей.

Моделирование механического стресса

Sentaurus Device предлагает ряд моделей, позволяющих точно описать воздействие стресса на подвижность носителей. Это феноменологические модели, основанные на тензорезистивности, и физические модели.

Одна из них, учитывающая индуцированные стрессом изменения границы валентной зоны, позволяет менять уровень механического напряжения в области канала до 1,5 ГПа, и для моделирования КМОП с SiGe стоком-истоком этого значения напряжения обычно вполне достаточно.

Модели туннелирования носителей

В расчетах работы гетероструктур и современных глубоко субмикронных КМОП-структур должно учитываться туннелирование носителей через потенциальный барьер. Для этого в Sentaurus Device есть несколько моделей, включая модель туннелирования Fowler-Nordheim'a, которая позволяет, в частности, с большой точностью предсказывать работу циклов записи и стирания в электрически стираемой памяти ЭСППЗУ (EEPROM).

Для случаев с прямым барьером, как при расчете затворной утечки через однослойный подзатворный оксид, может применяться модель прямого туннелирования носителей, которая является полной квантово-механической моделью.

Самая передовая модель туннелирования носителей в Sentaurus Device позволяет прогнозировать токи утечки через многослойный подзатворный диэлектрик, а также через барьер в контактах Шоттки. Она используется, например, для точного расчета эффекта плавающей подложки в частично обедненном *n*-канальном КМОП-КНИ-транзисторе, когда необходимо учитывать туннелирование электронов из валентной зоны канала в зону проводимости затвора, которое может существенно повысить число дырок в подложке.

Моделирование работы элементов памяти SONOS

Модель туннелирования носителей из ловушек в изоляторе важна для описания поведения подзатворного диэлектрика с высокой диэлектрической постоянной (*high-k*), так как плотность ловушек в нем обычно выше, чем в SiO₂. Она также может использоваться для моделирования работы ячейки энергонезависимой памяти SONOS.

Для элемента памяти SONOS характерна, в отличие от флэш-памяти или ЭСППЗУ, очень низкая подвижность носителей, захваченных ловушками в слое Si₃N₄. Для расчета распределения заряда в слое нитрида требуется моделирование переходных процессов.

Программа позволяет визуализировать распределение захваченных зарядов в слое нитрида и плотность носителей как функцию пространства и времени в процессе цикла записи-стирания.

Моделирование радиочастотной техники

Радиочастотные приборы характеризуются по времени их отклика на входной сигнал. Помимо моделирования переходных процессов, Sentaurus Device предлагает два пути расчета этого отклика: малосигнальный анализ (AC) и анализ в режиме гармонического баланса (HB).

Можно воспользоваться функцией визуализации AC-анализа: реакцию прибора и потоки тока/энергии при этом можно увидеть и произвести оптимизацию траектории малых токов для различных частот.

В отличие от AC-анализа, HB-анализ может применяться для моделирования сигналов произвольной амплитуды. Sentaurus Device обладает специализированными средствами для решения очень больших линейных систем, необходимого в HB-анализе.

Моделирование оптоэлектронных полупроводниковых приборов

Sentaurus Device предлагает широкий выбор моделей для расчета таких оптоэлектронных приборов, как светоизлучающие диоды (LEDs), приборы с зарядовой связью (CCDs), КМОП световые сенсоры (рис. 2.3), объемные лазеры и лазеры на структурах с квантовыми ямами, вертикально-щелевые лазеры с поверхностными излучателями (VCSELs).

Усовершенствованная модель лазера на GaN типе квантовых ям учитывает индуцированную напряжением поляризацию зарядов и эффекты изменения зонной структуры, вызванные высокой плотностью носителей.

Поддерживается моделирование относительной интенсивности шумов (RIN) и их частоты в полупроводниковых лазерах. Это делает возможным калибровку симулятора по экспериментально полученным данным.

Для более точного расчета работы светоизлучающего диода включена модель перепоглощения фотонов в двумерном и трехмерном исполнении.

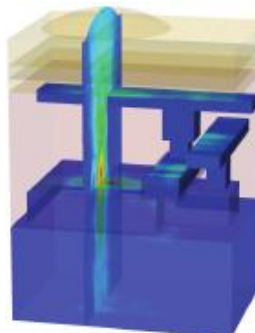


Рис. 2.3. Результаты моделирования КМОП-фотодиода

Модель Монте-Карло

Метод Монте-Карло применяется для описания нелинейного квазибаллистического транспорта носителей, который становится преимущественным в транзисторах с глубоко субмикронными размерами. Программа Sentaurus MOCA – метод Монте-Карло – включена как опция в состав Sentaurus Device начиная с версии X-2005.10.

Она содержит решение уравнения Шредингера, позволяющее учесть, например, такой квантовый эффект, как «отодвигание» электронов от границы раздела кремний-оксид, приводящее к снижению эффективной емкости затвора и тока транзистора.

Sentaurus MOCA полностью интегрирована с остальными программами Synopsys TCAD: структура прибора может быть сгенерирована при помощи Sentaurus Process, а результаты приборного моделирования можно увидеть в Sentaurus Workbench.

Построение сетки

Sentaurus Device включает два различных средства для построения конечно-элементной сетки: Mesh и Noffset3D.

Сеточный генератор Mesh на основе алгоритма Delauney генерирует сетку для 1D-, 2D- и 3D-моделирования. Однако, если исследуемая поверхность непланарна, при построении сетки могут возникнуть некоторые трудности.

Noffset3D вставляет слои параллельно поверхности в границах, определенных пользователем, которые впоследствии можно преобразовать в сетку, позволяющую более точно определять, например, токи в области канала транзистора.

И в Mesh, и в Noffset3D доступен способ генерирования сетки, позволяющий создавать сетки типа Delauney под контролем пользователя. Точной

настройкой параметров пользователь может задавать необходимую сетку, при этом регулировать число узлов в ней, ослабляя требование Delauney в некоторых местах.

Sentaurus Structure Editor

Sentaurus Structure Editor предназначен для редактирования двух- и трехмерных структур и трехмерной эмуляции процессов.

В режиме эмулятора процессов (Procem) Sentaurus Structure Editor переводит шаги таких технологических операций, как травление и осаждение, фотолитография, полировка, в геометрические действия, и наоборот. Например, на стенки геометрически сгенерированной щели может быть осажден тонкий слой оксида при помощи простой операции осаждения.

Используемые алгоритмы позволяют, в частности, моделировать направленное травление, которое используется в изготовлении ячейки флэш-памяти и качество которого (наклон боковых стенок вытравленной щели) сильно сказывается на характеристиках прибора.

Sentaurus Workbench

Обычно процесс моделирования предполагает, что пользователь запускает несколько приложений последовательно. Sentaurus Workbench осуществляет их взаимосвязь автоматически.

Задав набор входных параметров (так называемое дерево экспериментов, DoE), например различное время отжига пластины или дозу ионной имплантации, на выходе можно получить различные электрофизические характеристики прибора, а также оптимизировать их.

Формат записи файлов TDR предназначен для рационального накопления, чтения и записи большого количества научных данных. Sentaurus Workbench включает графическое средство для просмотра и редактирования таких файлов – Sentaurus Data Explorer.

Визуализатор Tecplot SV в составе Sentaurus Workbench позволяет строить разрезы любой структуры, причем работать в двух- и трехмерном режиме стало значительно проще.

При помощи программного модуля Calibration Kit в составе Sentaurus Workbench Advanced можно калибровать профили, смоделированные в Sentaurus Process, TSUPREM-4 и Dios, по профилям, полученным методом вторичной ионной масс-спектропии.

Sentaurus TCAD for Manufacturing

Sentaurus TFM – это программный продукт, предназначенный для связи между миром моделирования процессов и отдельных компонентов схемы и миром проектирования схем и их верификации.

Результаты моделирования технологии и физики прибора представляются в виде набора аналитических функций, называемого компактной процессной моделью – PCM. Этот набор является входным для дальнейшего схемотехнического моделирования в SPICE.

Известно, что преобладающим механизмом, наносящим убыток при производстве с топологическими нормами 90 нм и менее, становятся параметри-

ческие колебания из-за повышенной чувствительности характеристик таких приборов и схем к параметрам процессов.

Быстрое и упрощенное многомерное моделирование процесс – прибор – схема позволяет проанализировать факторы, которые могут приводить к потерям в производстве, связанным с параметрическими колебаниями.

Sentaurus TFM, таким образом, представляет собой концепцию снижения параметрических потерь, позволяющую более эффективно контролировать всю линию процессов в полупроводниковом производстве и повышать выход годных изделий в соответствии с новым принципом взаимодействия производства и проектирования.

3. ВИРТУАЛЬНОЕ ПРОИЗВОДСТВО С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ SYNOPSYS TCAD

Современный рынок микроэлектроники выдвигает очень жесткие требования к проектам ИС с точки зрения технологичности, тестируемости и таких ключевых аспектов, как размер кристалла, потребляемая мощность, выход годных изделий и стоимость, поэтому все большее значение приобретает включение в процесс проектирования программной среды виртуального производства [2]. Все наиболее значимые результаты в области формирования программной среды виртуального производства представлены в программном пакете Sentaurus (TCAD фирмы Synopsys). В основе системы TCAD фирмы Synopsys лежат мощные вычислительные программные инструменты для моделирования технологических процессов и приборных характеристик Sentaurus Process и Sentaurus Device. К важным характеристикам автоматизированного рабочего места Sentaurus Workbench относятся средства для обеспечения дружественного интерфейса с пользователем TCAD, включая графические возможности для построения и редактирования сложных проектов, параметризацию входных файлов для автоматического запуска групп задач, организацию вычислительного процесса внутри проектов и директорий, что позволяет четко ориентироваться в вычислительной среде. Программные модули обеспечивают планирование эксперимента, оптимизацию и статистический анализ в рамках проводимого исследования.

Каждый проект Synopsys TCAD может содержать семейство сценариев, а каждый сценарий – семейство экспериментов. Внутри каждого эксперимента варьируется определенный входной параметр. Параметры могут вводиться в любой точке вычислительного процесса – от технологического моделирования до стадии расчета прибора. Параметризованный проект представляется в виде дерева, которое строится на основе описания вычислительного процесса (потока) и комбинации варьируемых параметров. Уровни дерева соответствуют вычислительным этапам. На каждом вычислительном этапе запрашивается столько инструментальных программ, сколько имеется узлов на данном уровне дерева семейств. Каждый вызов вычислительного средства характеризуется комбинацией значений параметров, которая определяется путем от корня дерева к точке вызова, т.е. к данному узлу дерева семейств.

Любой узел дерева семейств имеет уникальный номер, и все выходные файлы с результатами вычислений, проведенных в этом узле, содержат номер узла в своем имени.

Специальные программы-редакторы позволяют сформировать тестовые структуры и образцы интегральных элементов и исследовать их отклик на внешние воздействия различного рода (электрические, электромагнитные, оптические, тепловые, механические и др.). Используемые для таких расчетов программы численного двух- и трехмерного моделирования обеспечивают работу виртуального комплекса в исследовательских целях, а также формируют набор данных для перехода к задачам схмотехнического проектирования. Встроенный в цикл работы виртуального производства этап экстракции схмотехнических параметров элементов готовит информацию для принятия решения о годности данных элементов по критериям, задаваемым дизайнерами схем, или о продолжении оптимизации технологического маршрута и конструкции элемента. Взаимосвязь всех этапов создает условия для обоснованного выбора параметров критичных технологических операций, обеспечивающих наиболее устойчивые к технологическому разбросу значения схмотехнических характеристик. Наиболее выигрышным является использование систем виртуального производства для анализа так называемых сплит-партий, или партий с «расщеплением» по одному или нескольким технологическим параметрам. В этом случае процесс моделирования фактически означает выполнение многофакторного виртуального эксперимента, построенного по определенному плану.

Обязательной частью системы виртуального производства являются программные средства для планирования эксперимента и анализа его результатов с использованием специальных математических моделей. Такие исследования направлены на изучение чувствительности рабочих характеристик прибора к разбросу технологических параметров, на оптимизацию разрабатываемых структур с точки зрения повышения их технологичности. Структура виртуального производства включает наряду с прикладными программами, предназначенными для расчета процессов/приборов и визуализации результатов, вычислительные оболочки для интеграции TCAD программных средств. Минимальный перечень задач, которые должны выполняться в рамках таких интегрирующих оболочек:

- автоматическая интеграция программ в рамках моделируемых проектов;
- организация пользовательского интерфейса к прикладным программам;
- планирование эксперимента;
- анализ зависимостей с использованием методологии поверхностей отклика;
- статистический анализ результатов, оптимизация.

4. ВОЗМОЖНОСТИ SYNOPSIS TCAD ДЛЯ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СВЕТОДИОДОВ

Процесс физического моделирования работы светодиодов очень сложен в силу их больших геометрических размеров (несколько сотен микрометров и более) [6]. При моделировании столь больших структур использование стандартных подходов к рассмотрению работы устройств с точки зрения электромагнитных явлений, происходящих в некоторой временной области, с помощью методов конечных разностей и конечных элементов невозможно. Стандартные методы предполагают использование, как минимум, десяти точек для каждой длины волны излучения, в итоге результирующее количество точек для структуры светодиода, даже при использовании двухмерной сетки, превысит 10 миллионов. Альтернативой стандартным методам является использование метода трассировки лучей, с помощью которого можно не только оценить оптическую интенсивность света внутри устройства, но и количество излучения, которое можно вывести наружу. Во многих случаях двухмерного моделирования недостаточно для точного учета всех физических явлений, возникающих при работе светодиода, и возникает необходимость использования трехмерной модели.

Synopsys TCAD позволяет не только рассчитывать оптимальные конструкции гетероструктур, но также дает возможность спроектировать конструкцию устройства, обеспечивающую оптимальную экстракцию генерируемого излучения.

4.1. Моделирование квантовых ям

Поскольку процессы излучательной рекомбинации в современных приборах происходят не в объемных полупроводниках, а в гетероструктурах, то основное внимание следует уделить моделированию процессов, происходящих в квантовых ямах. Явления диффузионно-дрейфового транспорта, описываемые гидродинамическими уравнениями и уравнениями непрерывности, не подходят для моделирования переноса носителей заряда через квантовые ямы, поскольку размер этих ям намного меньше, чем длина свободного пробега носителей. По этой причине для квантовых ям моделируются три основных явления:

- захват носителей в квантовую яму;
- процессы излучательной рекомбинации, происходящие в яме;
- вычисление усиления.

Процесс захвата носителей заряда в квантовой яме описывается с помощью баллистического приближения. Рассматриваются следующие типы рекомбинации:

- Оже-рекомбинация и рекомбинация Шоккли – Рида – Холла – обедняют квантовую яму и являются причиной возникновения темнового тока;
- излучательная рекомбинация – включает в себя процессы спонтанной и вынужденной рекомбинации.

Все эти типы рекомбинации должны быть включены в уравнения непрерывности для выполнения закона сохранения частиц в системе.

Для вычисления усиления используется золотое правило Ферми, которое количественно описывает излучательную эмиссию с помощью коэффициентов спонтанной и вынужденной эмиссии. Эти коэффициенты содержатся в оптической матрице M , которая описывает вероятность процесса излучательной рекомбинации. Для вычисления оптической матрицы квантовой ямы необходимо знать структуру энергетических зон и волновые функции.

Программный модуль Sentauros Device (см. подразд. 5.2) предлагает три варианта для вычисления спектра усиления.

1. Простая модель конечной ямы, имеющая аналитическое решение. В дополнение к этому эффекты, возникающие в результате напряжения структуры, и поляризационные эффекты учитываются в оптической матрице отдельно.

2. *kp*-метод, учитывающий эффекты напряжения структуры и влияние носителей заряда друг на друга. При расчете с помощью данного метода используются гамильтонианы 4×4 , 6×6 , 8×8 .

3. Модели усиления, заданные пользователем и написанные на языке C++.

4.2. Одномерное стационарное уравнение Шредингера

По умолчанию Sentauros Device использует простую модель конечной квантовой ямы, для этого в яме решается уравнение Шредингера. В квантовой яме носители ограничены в одном направлении. Интерес представляют энергетические подзоны квантовой ямы и волновые функции связанных состояний, которые могут быть найдены при решении уравнения Шредингера. При использовании простой модели квантовой ямы принимается допущение, что энергетические зоны электронов, тяжелых и легких дырок не связаны между собой, и энергетические подзоны находятся из решения одномерного уравнения Шредингера для каждой из этих зон отдельно. Используя приближение эффективной массы, стационарное одномерное уравнение Шредингера можно записать следующим образом:

$$\left(-\frac{\hbar^2}{2} \frac{\partial}{\partial x} \frac{1}{m(x)} \frac{\partial}{\partial x} + V(x) - E^i \right) \zeta^i(x) = 0,$$

где $\zeta^i(x)$ – i -я квантово-механическая волновая функция; E^i – i -е собственное значение энергии; $V(x)$ потенциал квантовой ямы конечной формы.

Включение простой модели конечной квантовой ямы производится при помощи добавления в командный файл Sentauros Device ключевых слов QWTransport и QWScatModel.

4.3. *kp*-метод

В Sentauros Device также доступен более совершенный способ моделирования квантовых ям, который позволяет точнее вычислять энергетические подзоны, а также учитывать эффекты напряжения кристаллической решетки и влияния носителей заряда друг на друга. Используемый в Sentauros Device

kp -метод основан на модели Люттингера – Коха. Для расчета вырождения тяжелых и легких дырок, спин-орбитального расщепления и зон проводимости можно использовать гамильтонианы с размерами 4×4 , 6×6 и 8×8 .

Согласно теореме Блоха волновая функция в периодической кристаллической решетке может быть представлена плоскими волнами следующим образом:

$$\Psi_{nk}(\mathbf{r}) = e^{i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}} \cdot u_{nk}(\mathbf{r}),$$

где $u_{nk}(\mathbf{r})$ – огибающая волновой функции, которая периодична на всей кристаллической решетке, т.е. $u_{nk}(\mathbf{r}) = u_{nk}(\mathbf{r} + \mathbf{R})$. Подставляя вышеописанное выражение в уравнение Шредингера, получим:

$$\mathbf{H}\Psi_{nk}(\mathbf{r}) = E_n(\mathbf{k})\Psi_{nk}(\mathbf{r}).$$

В результате уравнение для нахождения собственных значений волновой функции будет выглядеть следующим образом:

$$\mathbf{H}u_{nk}(\mathbf{r}) = E'(\mathbf{k})u_{nk}(\mathbf{r}),$$

где гамильтониан Люттингера – Коха имеет вид

$$\mathbf{H} = \frac{p^2}{2m} + V(\mathbf{r}) + \frac{\hbar^2 k^2}{2m_0} + \frac{\hbar}{4m_0^2 c^2} \nabla V \times \mathbf{p} \cdot \boldsymbol{\sigma} + \frac{\hbar}{m_0} \mathbf{k} \cdot \mathbf{p},$$

где $\boldsymbol{\sigma}$ – спиновая матрица Паули; V – изменение потенциала в районе квантовой ямы.

На потенциал V могут оказывать влияние взаимодействия носителей заряда друг с другом. В Sentaurus Device возможны два вида учета взаимодействия носителей заряда.

1. Теория свободного носителя заряда (FCT), в которой предполагается, что носители заряда не взаимодействуют друг с другом и поэтому не вносят какие-либо дополнительные изменения в потенциал ямы.

2. Модель многих тел, в которой учитывается кулоновское взаимодействие носителей заряда друг с другом. Учет данного эффекта производится путем введения экранированного потенциала Хатри – Фока (SHF).

Таким образом, при использовании kp -метода эффекты смешения валентных зон и эффекты взаимодействия носителей заряда между собой искажают зонную диаграмму полупроводника и ее форма становится не параболической. В этом случае интеграл, по которому считаются коэффициенты спонтанной и вынужденной эмиссии, необходимо брать в k -пространстве, а не в пространстве энергий. Основные особенности kp -метода:

- доступны модели расширения усиления Лоренца и гиперболического косинуса;
 - для полупроводников с кристаллической структурой цинковой обманки (GaAs) можно выбрать гамильтонианы размерами 4×4 , 6×6 и 8×8 с учетом явлений взаимодействий носителей зарядов по моделям FCT и SHF;
 - для полупроводников с кристаллической структурой вюрцита (GaN) возможно выбрать гамильтониан размером 6×6 с учетом явлений взаимодействий носителей зарядов по моделям FCT и SHF;
 - экранирование пьезоэлектрических полей носителями заряда, находящимися в квантовых ямах GaN, также может быть учтено при расчетах.

4.4. Взаимосвязь электрической и оптической моделей

Для моделирования работы светодиода необходимо решить систему, состоящую из следующих дифференциальных уравнений: уравнения Пуассона (нахождение электростатического потенциала решетки), уравнения непрерывности электронов и дырок (соблюдение закона сохранения частиц), теплового уравнения (нахождение температуры решетки) и уравнения Шредингера (нахождение волновых функций электронов и дырок, а также энергий подуровней в квантовой яме). На рис. 4.1 показана схема взаимодействия между различными системами уравнений, применяемых при решении задачи моделирования работы светодиода.



Рис. 4.1. Схема взаимодействия электрической и оптической моделей

Моделирование происходит следующим образом. Сначала решается система уравнений, состоящая из уравнений Пуассона, непрерывности, транспортного и теплового уравнений, а также уравнений рассеяния в квантовых ямах. Результатом решения этой системы является плотность носителей заряда в активных областях прибора. Полученное решение подставляется в уравнение Шредингера, решая которое, находят скорость и плотность мощности спонтанной эмиссии фотонов, скорость спонтанной эмиссии передается в первую систему уравнений для подстановки в уравнения непрерывности электронов и дырок.

Затем первая система заново решается с данными, полученными из решения уравнения Шредингера. Данная процедура повторяется до тех пор, пока решение не сойдется. После того как решение сошлось, плотность мощности спонтанной эмиссии, приходящаяся на каждый вертекс, находящийся в активной области прибора, передается в блок трассировки лучей. Также в этот блок передается информация о длине волны излучения, коэффициенте преломления материала и его абсорбционной способности. После выполнения процедуры трассировки лучей в первую систему уравнений передается информация о лучах, проходящих через активную область и вызывающих

вследствие этого вынужденную эмиссию. Первая система уравнений решается с учетом этих данных, и весь цикл повторяется снова до тех пор, пока не будет достигнута сходимость всей системы.

4.5. Выводы

Спектр усиления спонтанного излучения светодиодов постоянно растет с увеличением подаваемого на прибор напряжения. Лимитирующим фактором этого роста является полное заполнение квантовой ямы носителями заряда. После того как произошло заполнение, ток утечки начинает быстро возрастать. В связи с этим при проектировании светодиодов приходится решать две основные задачи.

1. Эффективность экстракции. Данная проблема по большей части связана с геометрической формой устройства. Например, многие светодиоды имеют наклонные боковые стенки для улучшения вывода света из устройства. Угол наклона боковых стенок может быть задан в качестве переменной при планировании вычислительного эксперимента в программной оболочке Sentaurus Workbench. Для оптимизации геометрии прибора с целью повышения эффективности экстракции света имеется возможность автоматически подбирать наилучшее значение для заданной переменной.

2. Равномерное распределение тока. Наилучшим вариантом является равномерное распределение тока по всей площади активной области прибора, это увеличивает общую интенсивность спонтанной эмиссии. Программный модуль Sentaurus Device позволяет отключить процедуру трассировки лучей при моделировании светодиода. При отключенной трассировке нельзя вычислить эффективность экстракции и диаграмму направленности излучения, но можно будет рассчитать полную мощность спонтанной эмиссии. Это позволит намного быстрее добиться оптимизации структуры устройства с целью повышения равномерности распределения тока.

Таким образом, программный пакет Synopsys TCAD позволяет производить детальное моделирование как электрических, так и оптических процессов, происходящих в устройстве. Эти возможности позволяют разрабатывать гетероструктуры на основе полупроводников GaN и GaAs, а также производить расчет оптимальной конструкции светодиода.

5. РАБОТА С МОДУЛЯМИ SYNOPSYS TCAD

На рис. 5.1 представлена схема взаимодействия программных модулей Synopsys TCAD.

Как видно из схемы, на вход программных модулей Sentaurus Process и Sentaurus Device подаются соответствующие командные файлы. При этом командный файл Sentaurus Process, содержащий описание технологического процесса в виде последовательности команд, может быть получен пользователем двумя способами:

- непосредственным набором в текстовом редакторе;

- описанием технологического процесса в графической среде программного модуля Ligament, который затем автоматически сформирует командный файл.

На практике наибольшее распространение получил второй способ, который и будет рассмотрен далее.

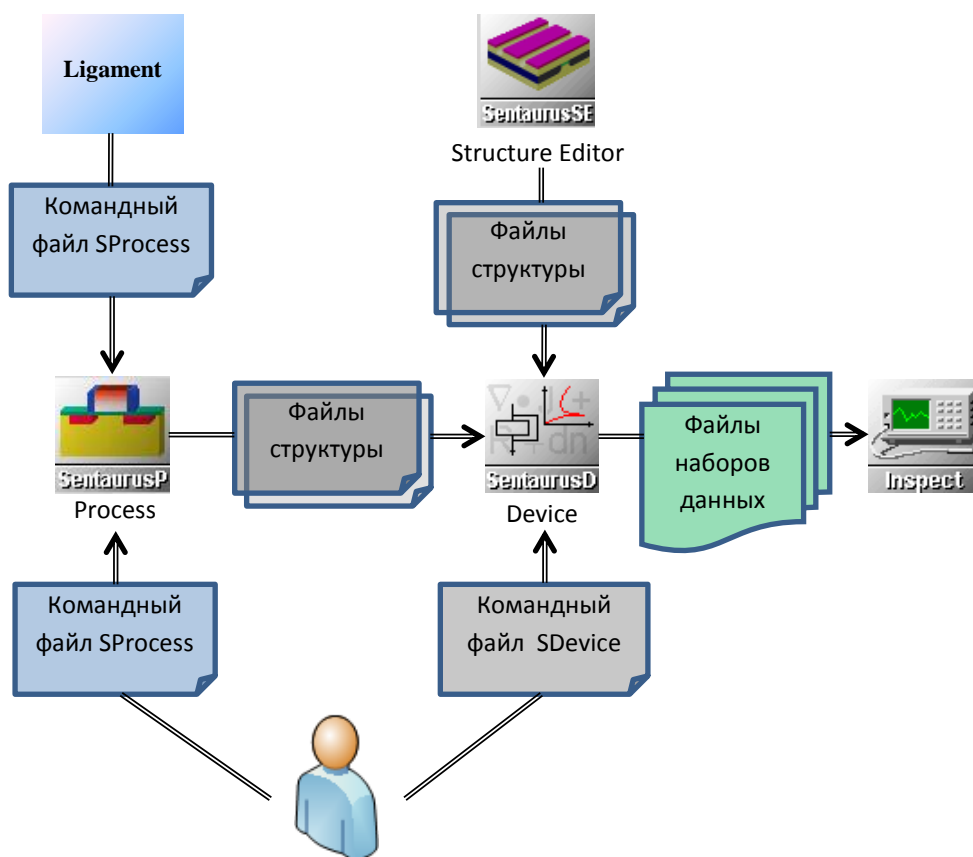


Рис. 5.1. Схема взаимодействия программных модулей Synopsys TCAD

Также следует отметить (см. рис. 5.1), что файлы структуры прибора могут быть получены как в результате технологического моделирования (например, выходные файлы Setaurus Process), так и в результате графического задания структуры в Setaurus Structure Editor.

5.1. Setaurus Process

Setaurus Process является основным модулем для моделирования технологических процессов в пакете TCAD. В ISE TCAD он назывался Floors.

Setaurus Process позволяет выполнять одно-, двух- и трехмерное моделирование. Здесь мы для примера рассмотрим двухмерный (Two Dimensional, или 2D) вариант.

Ниже описываются основные широко используемые команды управления и моделирования процессов на примере 0,18 мкм *n*-канального MOSFET-транзистора. В примере для простоты используются модели и параметры по умолчанию.

5.1.1. Задание начальной двумерной сетки

Начальная сетка задается следующим списком команд:

```
line x location= 0.0 spacing= 1.0<nm> tag=SiTop  
line x location=50.0<nm> spacing=10.0<nm>  
line x location= 0.5<um> spacing=50.0<nm>  
line x location= 2.0<um> spacing= 0.2<um>  
line x location= 4.0<um> spacing= 0.4<um>  
line x location=10.0<um> spacing= 2.0<um> tag=SiBottom
```

```
line y location=0.0 spacing=50.0<nm> tag=Mid  
line y location=0.40<um> spacing=50.0<nm> tag=Right
```

Sentaurus Process использует следующие оси координат: ось *X* – направлена вниз (в подложку), ось *Y* – слева направо (параллельно пластине).

Здесь используется зависящий от глубины (координата по *X*) шаг сетки, который меньше на поверхности пластины и больше по мере заглубления. В горизонтальной плоскости (ось *Y*) используется постоянный шаг сетки (рис. 5.2). Для дальнейшего использования также определены теги (*tag*), обозначающие верх и дно пластины, а также середину и правую границу будущего устройства.

Следует отметить, что Sentaurus Process проводит только одномерное моделирование до момента первого использования маски. Инициализация сетки для двумерного моделирования должна выполняться с большей аккуратностью, чем для одномерного, так как общее количество узлов сетки, от которого непосредственно зависит время расчета, вычисляется умножением шага по *X* на шаг по *Y*. Поэтому рекомендуется начинать с разреженной сетки.

Узлы сетки будут добавлены автоматически по ходу моделирования. Изначально густая сетка замедлит расчет первых технологических операций. После запуска моделирования можно управлять построением сетки, изменяя правила посредством команды MGOALS.

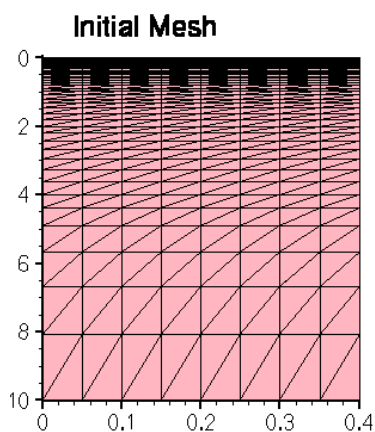


Рис. 5.2. Начальная двумерная сетка

5.1.2. Область моделирования и инициализация

Начальная область моделирования задается командой region:

```
region silicon xlo=SiTop xhi=SiBottom ylo=Mid yhi=Right  
init concentration=1.0e+15<cm-3> field=Phosphorus  
wafer.orient=100
```

Для двухмерного моделирования область подложки определяется через теги по осям X и Y. Эти теги были определены ранее командой line.

Здесь используется *n*-подложка с концентрацией фосфора 10^{15} см^{-3} . Задана ориентация подложки (100), что является значением по умолчанию.

5.1.3. Ионная имплантация

Выполняются три операции имплантации бора:

```
implant Boron dose=2.0e13<cm-2> energy=200<keV> tilt=0 rotation=0  
implant Boron dose=1.0e13<cm-2> energy= 80<keV> tilt=0 rotation=0  
implant Boron dose=2.0e12<cm-2> energy= 25<keV> tilt=0 rotation=0
```

В каждом случае заданы доза и энергия имплантации, бомбардировка осуществляется перпендикулярно поверхности пластины.

5.1.4. Выращивание подзатворного окисла

Подзатворный окисел выращивается при температуре $850 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 10 мин в чистом кислороде с использованием следующих команд:

```
mgoals on min.normal.size=1<nm> max.lateral.size=2.0<um> \  
normal.growth.ratio=1.4 accuracy=2e-5  
  
diffuse temperature=850<C> time=10.0<min> O2  
grid remesh  
select z=Boron  
layers
```

Перед собственно шагом диффузии определяется стратегия построения сетки MGOALS. Ключевое слово O2 является сокращенным обозначением для среды чистого кислорода при давлении в 1 атм. Команда grid remesh принудительно создает сетку MGOALS в только что созданном слое оксида.

Команда layers показывает, что толщина выращенного оксида составляет 3,2 нм:

```
{ Top Bottom Integral Material}  
{-2.46e-03 7.97e-04 2.67e+09 Oxide }  
{ 7.97e-04 1.00e+01 3.21e+13 Silicon}
```

5.1.5. Создание поликремниевого затвора

Поликремниевый затвор создается следующим образом:


```
deposit poly type=anisotropic thickness=0.18<um>
mask name=gate_mask left=-1 right=90<nm>

etch poly type=anisotropic thickness=0.2<um> mask=gate_mask
etch oxide type=anisotropic thickness=0.1<um>
```

Сначала слой поликремния 0,18 мкм осаждается поверх всей структуры. Ключевое слово `type=anisotropic` означает, что слой выращивается только в вертикальном направлении.

Далее с помощью команды `mask` определяется маска для защиты области затвора. В этом проекте моделируется только половина транзистора. Поэтому левая граница маски неважна и задано значение `-1`. Маске присвоено имя `gate_mask` для дальнейших ссылок на нее.

Первая команда `etch` ссылается на только что созданную маску и поэтому травится только часть поликремния, не защищенная маской. Обратите внимание, что заданная глубина травления (0,2 мкм) больше осажденного слоя. Избыточное травление гарантирует отсутствие остаточных островков. Задано анизотропное травление, поэтому применяемая маска проецируется строго вниз без какого-либо подтравливания.

Второе выражение `etch` не использует маску, однако естественной маской выступает поликремний в выборочном процессе травления. Снова используется рассмотренное избыточное травление.

5.1.6. Работа с масками

Маски должны быть определены до того, как они будут использоваться. Например, `imp_mask` является блоком, располагающимся от `-1` до 2 мкм и от 4 до 20 мкм:

```
mask clear
mask name=imp_mask left=-1.0<um> right= 2.0<um>
mask name=imp_mask left= 4.0<um> right=20.0<um>
```

Маски могут быть инвертированы с помощью параметра `negative`. Для примера, `etch_mask` будет предотвращать травление от 2 до 4 мкм:

```
mask clear
mask name=etch_mask left=-1.0<um> right= 2.0<um> negative
mask name=etch_mask left= 4.0<um> right=20.0<um> negative
```

К командам, использующим маски, относятся `implant`, `etch` и `deposit`. Например, имплантация бора реализуется командой `implant` со ссылкой на предварительно объявленную маску:

```
implant Boron mask=imp_mask dose=2e13<cm-2> energy=30<keV>
```

5.1.7. Окисление поликремния

Чтобы убрать напряжения, тонкая пленка оксида выращивается на поверхности поликремния перед формированием спейсера:

```
diffuse temperature=900<C> time=10.0<min> O2 preszure=0.5<atm> \
mgoals.native
```

В данном случае значение давления по умолчанию в 1 атм заменяется явным указанием значения 0,5 атм. На всех этапах диффузии Sentaurus Process учитывает очень тонкий слой оксида, который всегда присутствует на кремнии и быстро формируется на вновь созданных поверхностях (рис. 5.3). Ключевое слово `mgoals.native` задает использование механизма MGOALS для формирования этого слоя, что рекомендуется для сложных геометрических структур.

MGOALS автоматически воссоздает сетку в тонком слое оксида и в смежных слоях кремния и поликремния (рис. 5.4).

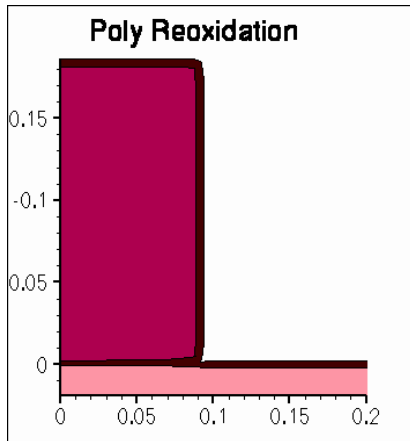


Рис. 5.3. Окисление поликремния слое слоях

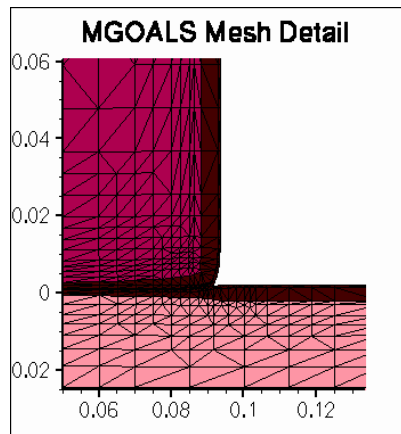


Рис. 5.4. Сетка в тонком оксида и смежных поликремния и

кремния

Приведем дальнейшие команды технологического процесса:

```
#--- LDD implantation -----
refinebox silicon min= {0.0 0.05} max= {0.1 0.12} \
  xrefine= {0.01 0.01 0.01} yrefine= {0.01 0.01 0.01} add
refinebox remesh
```

```
implant Arsenic dose=4e14<cm-2> energy=10<keV> tilt=0 rotation=0
diffuse temperature=1050<C> time=0.1<s> ; # Quick activation
struct tdr=NMOS5 ; # LDD Implant
```

```
#--- Halo implantation: Quad HALO implants -----
implant Boron dose=0.25e13<cm-2> energy=20<keV> \
  tilt=30<degree> rotation=0
implant Boron dose=0.25e13<cm-2> energy=20<keV> \
```

```

    tilt=30<degree> rotation=90<degree>
    implant Boron dose=0.25e13<cm-2> energy=20<keV> \
    tilt=30<degree> rotation=180<degree>
    implant Boron dose=0.25e13<cm-2> energy=20<keV> \
    tilt=30<degree> rotation=270<degree>

#--- RTA of LDD/HALO implants -----
diffuse temperature=1050<C> time=5.0<s>
struct tdr=NMOS6 ; # Halo RTA

#--- Nitride spacer -----
deposit nitride type=isotropic thickness=60<nm>
etch nitride type=anisotropic thickness=84<nm>
etch oxide type=anisotropic thickness=10<nm>
struct tdr=NMOS7 ; # Spacer

#--- N+ implantation -----
refinebox silicon min= {0.04 0.05} max= {0.18 0.4} \
    xrefine= {0.01 0.01 0.01} yrefine= {0.05 0.05 0.05} add
refinebox remesh
    implant Arsenic dose=5e15<cm-2> energy=40<keV> \
    tilt=7<degree> rotation=-90<degree>

#--- N+ implantation & final RTA -----
diffuse temperature=1050<C> time=10.0<s>
struct tdr=NMOS8 ; # S/D implants

```

Пропустим описание этого блока, так как он реализуется способами, аналогичными уже рассмотренным, и перейдем к формированию контактных площадок.

5.1.8. Контактные площадки

Контактные площадки формируются следующим образом:

```

deposit Aluminum type=isotropic thickness=30<nm>

mask name=contacts_mask left=0.2<um> right=1.0<um>
etch Aluminum type=anisotropic thickness=0.25<um> mask=contacts_mask
etch Aluminum type=isotropic thickness=0.02<um> mask=contacts_mask

```

Моделирование реального процесса не производится. Металлические площадки создаются последовательным осаждением и травлением их для дальнейшего использования при моделировании прибора. Способ аналогичен примененному при создании поликремниевого затвора.

5.1.9. Сохранение всей структуры

Чтобы сохранить всю полученную структуру, необходимо:

```
transform reflect left
struct smesh=NMOS
```

Сначала выполняется зеркальное отражение структуры относительно левой границы посредством команды transform. Затем вся структура сохраняется с помощью команды struct. Ключевое слово smesh указывает на создание всех данных для передачи граммных модули Mesh и Structure Editor.

Структура сохраняется в старом файле с помощью следующей командой:

```
struct
```

Итоговая структура на рис. 5.5.

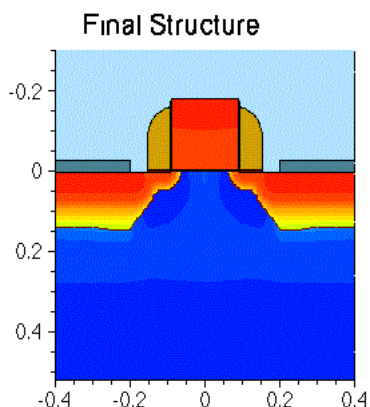


Рис. 5.5. Итоговая структура

также может быть сохранена в формате DF-ISE следующей командой:

```
ise.mdrow=NMOS
```

структура представлена

5.1.10. Сохранение одномерных разрезов

Одномерные разрезы могут быть сохранены в любой интересующей нас точке технологического маршрута следующим образом:

```
SetPlxList {BTotal NetActive}
WritePlx NMOS_channel.plx y=0.0 silicon
```

```
SetPlxList {AsTotal BTotal NetActive}
WritePlx NMOS_idd.plx y=0.1 silicon
```

```
SetPlxList {AsTotal BTotal NetActive}
WritePlx NMOS_sd.plx y=0.35 silicon
```

Результаты представлены на рис. 5.6, 5.7.

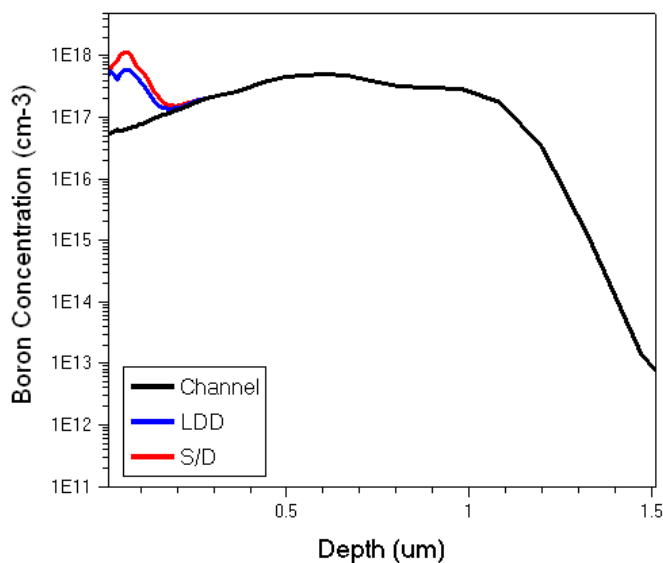


Рис. 5.6. Зависимость концентрации акцептора (бор) в канале (черный)

цвет), в слабо легированной области (синий)
и истоке/стоке (красный) от глубины

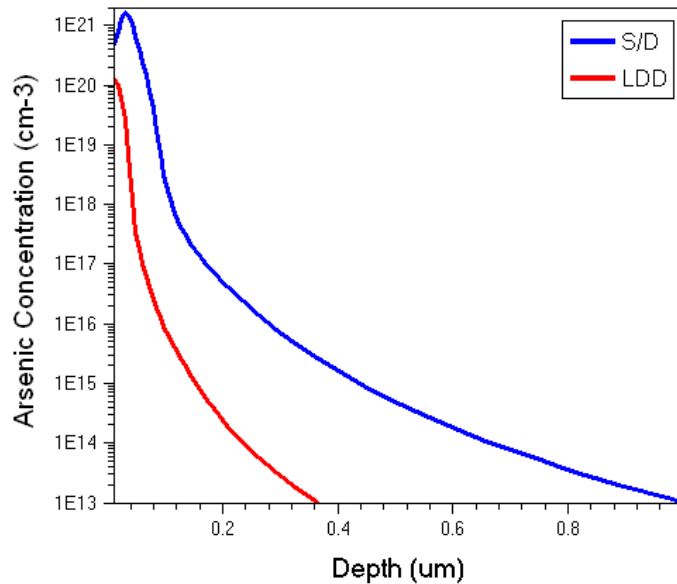


Рис. 5.7. Зависимость концентрации доноров (мышьяк) в истоке/стоке (синий цвет) и слабо легированной области (красный) от глубины

5.2. Sentaurus Device

Sentaurus Device является разносторонним модулем для моделирования полупроводниковых устройств, обеспечивающим эмуляцию электрических, температурных и оптических характеристик кремниевых и гетероструктурных приборов. Он позволяет работать с одно-, двух-, трехмерными моделями в различных условиях функционирования устройства.

5.2.1. Входной командный файл Sentaurus Device

Рассмотрим структуру командного файла Sentaurus Device на примере моделирования вольт-амперных характеристик Si MOSFET, командный файл в данном случае выглядит следующим образом:

```
File {  
  * input files:  
  Grid = «nmos_msh.tdr»  
  * output files:  
  Plot = «n1_des.tdr»
```

```

Current = «n1_des.plt»
Output = «n1_des.log»
}

Electrode {
  { Name=«source» Voltage=0.0 }
  { Name=«drain» Voltage=0.1 }
  { Name=«gate» Voltage=0.0 Barrier=-0.55 }
  { Name=«substrate» Voltage=0.0 }
}
Physics {
  Mobility (DopingDependence HighFieldSat Enormal)
  EffectiveIntrinsicDensity (BandGapNarrowing (OldSlotboom))
}

Plot {
  eDensity hDensity eCurrent hCurrent
  Potential SpaceCharge ElectricField
  eMobility hMobility eVelocity hVelocity
  Doping DonorConcentration AcceptorConcentration
}

Math {
  Extrapolate
  RelErrControl
}

Solve {
  #-initial solution:
  Poisson
  Coupled { Poisson Electron }
  #-ramp gate:
  Quasistationary (
    Goal{ Name=«gate» Voltage=2 } )
    { Coupled { Poisson Electron } }
}

```

5.2.1.1. Секция File

Как видно из примера, в первом блоке командного файла задаются файлы входных и выходных данных.

```

File {
  * input files:
  Grid = «nmos_msh.tdr»
  * output files:
  Plot = «n1_des.tdr»
  Current = «n1_des.plt»
  Output = «n1_des.log»
}

```

Разберем этот раздел подробнее.

File { – эта строка открывает раздел описания файлов данных и результатов моделирования.

* input files: – комментарий, указывающий, что ниже будут заданы имена входных файлов.

Grid = «nmos_msh.tdr» – входной файл, необходимый для моделирования (по умолчанию используется расширение *.tdr), где задана сетка, на которой будут решаться дифференциальные уравнения, а также области устройства, включая различного рода контакты. Sentaurus Device автоматически определяет размерность модели, заданной в этом файле. Также в нем содержится информация о профилях легирования структуры устройства.

* output files: – комментарий, указывающий, что ниже будут заданы имена выходных файлов.

Plot = «n1_des.tdr» – выходной файл, в который будет записано итоговое пространственное распределение всех рассчитываемых величин (файл имеет расширение _des.tdr). Данный файл представляет собой структуру устройства с сеткой, идентичной той, что была задана во входном файле *.tdr. После расчета в узлах этой сетки сохраняются значения переменных, указанных в секции Plot командного файла (описание секции Plot приводится ниже).

Current = «n1_des.plt» – в этот файл записываются электрические выходные данные (такие как токи, напряжения, заряды на электродах и т.д.). Обычно имя файла имеет окончание _des.plt. В рассматриваемом примере отсутствует секция CurrentPlot, где можно указать переменные, значения которых будут записываться в данный файл. В нашем случае будет записана только базовая информация о токах, напряжениях и зарядах на электродах устройства.

Output = «n1_des.log» – в этой строке указано имя файла, в который будет записан лог (протокол работы Sentaurus Device).

После описания всех файлов необходимо закрыть раздел, используя символ }.

Следует отметить, что приведенный способ задания входных данных не является единственно возможным. В более ранних версиях программного модуля для задания сетки и данных о легировании устройства использовались два различных файла с расширениями – *.grd и *.dat соответственно. Секция File при этом выглядела следующим образом:

```
File {
  * input files:
  Grid = «nmos_msh.grd»
  Doping = «nmos_msh.dat»
  * output files:
  Plot = «n1_des.dat»
  Current = «n1_des.plt»
  Output = «n1_des.log»
}
```

Обратите внимание, что в этом случае выходной файл, указанный как Plot, также имеет расширение *.dat, т.е. в файле отсутствует информация о сетке, на которой получены данные. Для последующей визуализации данного файла необходимо использовать сетку файла, указанного как Grid, то есть файлы n1_des.dat и nmos_msh.grd необходимо загружать в программный модуль Inspect вместе (см. подразд. 5.3).

В более сложных случаях к входным файлам может добавляться файл параметров, имеющий расширение *.par. В данном файле задаются параметры моделей для материалов, используемых в расчетах. Подключается файл параметров следующей строкой:

```
Parameter = «nmos.par»
```

Еще одним важным моментом, на который следует обратить внимание, является использование в качестве имен файлов служебных переменных Setaurus Workbench (SWB). Если Setaurus Device интегрирован в проект SWB, нет необходимости использовать статические имена файлов, можно лишь указать имена переменных и SWB автоматически заменит их на имена файлов при процедуре предварительной обработки. Служебные переменные SWB имеют следующие имена:

Входные файлы:

```
@grid@ – *.grd-файл сетки;  
@doping@ – *.dat-файл легирования;  
@tdr@ – *.tdr-файл структуры;  
@parameter@ – *.par-файл параметров.
```

Выходные файлы:

```
@plot@ – *.dat-файл данных;  
@dat@ – *.plt-файл данных;  
@tdrdat@ – *.tdr-файл данных;  
@log@ – *.log-файл.
```

В случае использования переменных секция File рассматриваемого примера будет выглядеть следующим образом:

```
File {  
  * input files:  
  Grid = «@tdr@»  
  * output files:  
  Plot = «@tdrdat@»  
  Current = «@plot@»  
  Output = «@log@»  
}
```

Использование в качестве имен файлов переменных удобно при планировании больших экспериментов с десятками и сотнями входных и выходных файлов.

5.2.1.2. Секция Electrode

Следующая секция называется Electrode и содержит в себе информацию об электродах устройства, на которые будут подаваться и измеряться напряжения и токи. В Sentaurus Device электроды задаются с помощью электрических граничных условий и не содержат в себе сетку. В секции Electrode определяются все электроды, которые будут использоваться при моделировании работы устройства, а также начальные граничные условия и начальные напряжения смещения на них. Если структура имеет контакты, не описанные в данной секции, то они будут проигнорированы.

Рассмотрим секцию Electrode, приведенную в примере:

```
Electrode {  
  { Name=«source» Voltage=0.0 }  
  { Name=«drain» Voltage=0.1 }  
  { Name=«gate» Voltage=0.0 Barrier=-0.55 }  
  { Name=«substrate» Voltage=0.0 }  
}
```

Electrode { – строка открывающая секцию описания электродов.

{ Name=«source» Voltage=0.0 } – строка описания электрода:

Name=«source» – задается имя электрода, в данном случае source, это имя должно в точности совпадать с именем, присвоенным электроду при создании структуры устройства;

Voltage=0.0 – начальное напряжение на данном контакте (в вольтах), с которого начнется расчет структуры. Если заданное значение будет сильно отличаться от нуля, велика вероятность, что начальное решение фундаментальной системы уравнений (ФСУ) не сойдется. Для того чтобы избежать этой ситуации, следует указывать значения, близкие к нулю, а в случае необходимости получения большего напряжения на контакте – постепенно увеличивать его с помощью операции Quasistationary в блоке Solve.

По умолчанию все контакты в структуре рассматриваются как омические, то есть потенциальный барьер между областью полупроводника и областью контакта отсутствует. В случае необходимости задания неомического контакта к описанию добавляются параметры барьера:

```
{ Name=«gate» Voltage=0.0 Barrier=-0.55 }
```

В данном случае барьер задан с помощью выражения

```
Barrier=-0.55
```

Эта запись означает, что разность положений уровня Ферми материала контакта и материала полупроводника составляет $-0,55$ эВ. Если электрод является контактом Шоттки (например, затвор полевого транзистора), то пе-

ред заданием барьера необходимо включить соответствующую модель с помощью команды Shottky. Задание такого контакта будет выглядеть следующим образом:

```
{ Name=«gate» Voltage=0.0 Shottky Barrier=-0.55 }
```

Секция Electrode имеет гораздо больше возможностей, чем описано выше, для ознакомления с которыми необходимо обратиться к соответствующей главе руководства пользователя Sentaurus Device [6].

5.2.1.3. Секция Physics

В данной секции определяются физические модели, которые будут использоваться при моделировании устройства. В частности, для нашего примера достаточно указать базовые модели для расчета подвижности и ширины запрещенной зоны (а следовательно, и собственной концентрации носителей заряда). Для упрощения из примера был исключен расчет ряда потенциально важных эффектов (например, ударная ионизация), способных существенно повлиять на работу прибора. В итоге секция выглядит следующим образом:

```
Physics {  
  Mobility (DopingDependence HighFieldSat Enormal)  
  EffectiveIntrinsicDensity (BandGapNarrowing (OldSlotboom))  
}
```

Строка Physics { – открывает секцию.

Mobility (DopingDependence HighFieldSat Enormal) – задание модели подвижности носителей заряда. В данном случае учитываются эффекты влияния на подвижность концентрации легирующей примеси и температуры устройства (DopingDependence), моделируется эффект насыщения скорости в сильном электрическом поле (HighFieldSat), а также учитывается влияние на подвижность перпендикулярного электрического поля (Enormal).

EffectiveIntrinsicDensity (BandGapNarrowing (OldSlotboom)) – задание модели расчета концентрации собственных носителей заряда, для этого рассчитывается изменение ширины запрещенной зоны (BandGapNarrowing) по модели OldSlotboom.

Для простого моделирования этого достаточно, однако при расчете реальных устройств появляется необходимость учета множества эффектов и количество строк в данной секции может быть намного больше. С точки зрения результатов моделирования данная секция является наиболее важной, поскольку именно набор физических моделей, используемых при расчетах, в конечном итоге определяет, насколько модель приближена к реальности. Полное описание всех физических моделей, поддерживаемых Sentaurus Device, можно найти в руководстве пользователя [6]. Следует помнить, что при подключении различных моделей в секции Physics происходит модификация уравнений решаемой симулятором ФСУ, и поэтому добавление или удаление некоторых моделей оказывает существенное влияние на сходимость

решения системы. Если после добавления какой-либо модели решение перестало сходиться, необходимо предпринять следующие действия.

1. Проверить параметры модели и материала, заданные в файле *.par.
2. Проанализировать содержание секции Math на предмет включения в нее команд, необходимых для корректной работы вновь добавленной модели.
3. Проанализировать сетку устройства и при необходимости уменьшить ее шаг в областях, критичных для работы вновь добавленной модели.

Как правило, одно из вышеуказанных действий позволяет решить проблемы со сходимостью.

5.2.1.4. Секция Plot

В секции Plot перечисляются имена переменных, значения которых будут записаны в выходной файл *.tdr. Для нашего примера секция будет выглядеть так:

```
Plot {  
  eDensity hDensity eCurrent hCurrent  
  Potential SpaceCharge ElectricField  
  eMobility hMobility eVelocity hVelocity  
  Doping DonorConcentration AcceptorConcentration  
}
```

Строка Plot { – открывает секцию, в следующих за ней строках через пробел перечисляются названия переменных. Обычно имя переменной говорит о том, какие данные она содержит, например:

eDensity – плотность электронов;

hDensity – плотность дырок;

eCurrent – электронный ток;

hCurrent – дырочный ток и т.д.

Для того чтобы сохранить значения векторных величин, необходимо добавить ключевое слово /Vector после имени переменной, например:

```
Plot { eCurrent/Vector ElectricField/Vector }
```

Полный список всех переменных, используемых в Sentaurus Device, приведен в приложении к руководству пользователя [6].

5.2.1.5. Секция Math

Секция Math содержит настройки, отвечающие за решение ФСУ. Sentaurus Device в ходе своей работы решает систему дифференциальных уравнений в частных производных, расчет осуществляется итеративно на дискретной сетке. Для каждой итерации рассчитывается величина ошибки, и если эта величина меньше заданного значения, то предполагается, что решение сошлось. В секции Math можно указать величины минимально допустимых ошибок для различных уравнений ФСУ, выбрать тип программы, используемой для решения уравнений, и многое другое. Более подробно

команды, используемые в секции Math, описаны в руководстве пользователя [6]. В данном примере секция Math выглядит следующим образом:

```
Math {  
  Extrapolate  
  RelErrControl  
}
```

Строка Math { – открывает секцию.

Extrapolate – команда, которая при квазистатическом смещении напряжения на электроде позволяет использовать в качестве начальных условий решения ФСУ данные, полученные путем экстраполяции двух предыдущих точек (если они существуют).

RelErrControl – данная команда переключает проверку ошибок из режима по умолчанию в режим с настройками, указанными командами типа ErrRef, которые имеют более понятный физический смысл.

5.2.1.6. Секция Solve

Последняя секция в командном файле называется Solve. В ней определяется последовательность задач, которые будут решаться Sentaurus Device. В приведенном примере начальное напряжение смещения на стоке составляет 100 мВ, а напряжения на истоке и на подложке – 0 В. Для расчета ВАХ необходимо изменить напряжение на затворе от 0 до 2 В, при этом найдя решение во всех точках, находящихся в данном промежутке напряжений. По умолчанию количество точек внутри интервала рассчитывается по алгоритму, нацеленному на то, чтобы обеспечить наиболее надежную сходимость решения. В случае если решение не сходится, шаг изменения напряжения уменьшается и расчет производится вновь для более близкого к последней сошедшейся точке значения напряжения. Данные, полученные в процессе моделирования (напряжения, токи и заряды на электродах устройства), сохраняются в файле n1_des.plt после каждого шага, на котором решение сошло. После окончания расчета данные можно посмотреть, воспользовавшись Inspect (см. подразд. 5.3). Рассмотрим секцию Solve, приведенную в примере, более детально:

```
Solve {  
  #-initial solution:  
  Poisson  
  Coupled { Poisson Electron }  
  #-ramp gate:  
  Quasistationary (  
    Goal{ Name=«gate» Voltage=2 } )  
    { Coupled { Poisson Electron } }  
}
```

Solve { – строка, открывающая секцию.

#-initial solution: – комментарий, обозначает начало блока, в котором вычисляется начальное решение.

Poisson – команда, рассчитывающая уравнение Пуассона, решение которого в дальнейшем используется как начальное решение для ФСУ.

Coupled { Poisson Electron } – команда, решающая систему, состоящую из уравнения Пуассона и уравнения непрерывности для электронов. Начальным предположением служит решение уравнения Пуассона, полученное на предыдущем шаге.

```
Quasistationary (
  Goal{ Name=«gate» Voltage=2 } )
{ Coupled { Poisson Electron } }
```

Выражение Quasistationary определяет, какие квазистатические, т.е. находящиеся в равновесном состоянии, решения будут получены в ходе расчета. Набор целевых значений напряжений, которые должны быть достигнуты на каждом из электродов, задается внутри скобок блока Goal. В данном примере последовательность решений находится для ряда напряжений на затворе, постепенно увеличивающихся от 0 до 2 В. Для этого решается система из уравнения Пуассона и уравнения непрерывности для электронов (выражение Coupled { Poisson Electron }).

В примере была рассмотрена базовая структура командного файла Sentaurus Device. В зависимости от цели и задач моделирования вид командного файла может претерпевать существенные изменения, но его базовая структура в целом остается неизменной.

5.2.2. Запуск Sentaurus Device

Запуск Sentaurus Device из командной строки осуществляется следующим образом:

```
> sdevice [command_file_name]
```

Необязательный параметр [command_file_name] указывает на входной командный файл Sentaurus Device, например:

```
> sdevice pp1_des.cmd
```

Отображение списка параметров командной строки Sentaurus Device выполняется следующим образом:

```
> sdevice -h
```

При каждом запуске Sentaurus Device сохраняет в файле журнала информацию о процессе моделирования. Имя файла повторяет имя входного командного файла, но имеет расширение .log. Файл журнала содержит, например, версию Sentaurus Device и описание хоста, на котором он запущен, файлы структуры устройства, активные модели и применяемые параметры, отчет о решении и, возможно, сообщения об ошибках.

5.2.3. Результаты расчета

После окончания расчета данные записываются в выходные файлы, имена которых были указаны в секции File. Для просмотра файлов *.plt используется программный модуль Inspect (см. подразд. 5.3). Для рассмотренного примера если внешнее напряжение на затворе (переменная OuterVoltage в разделе электрода gate) отложить по оси X, а электронный ток стока (переменная eCurrent в разделе электрода drain) отложить по оси Y, то в итоге получим изображение, показанное на рис. 5.8.

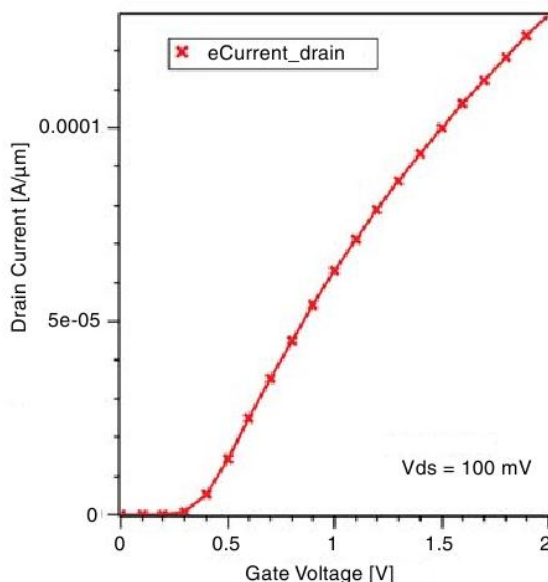


Рис. 5.8. Зависимость тока стока от напряжения на затворе

Каждая точка на графике соответствует решению ФСУ при определенном постоянном напряжении на затворе. Как видно из рисунка, шаг изменения напряжения составил 0,1 В и был постоянен на протяжении всего расчета.

5.3. Sentaurus Inspect

Inspect является модулем, предназначенным для эффективного просмотра графиков, кроме того, он позволяет экстрагировать параметры. Пользователь может в интерактивном режиме настраивать отображение кривых на графике, используя для этого скрипты.

Inspect содержит большой набор математических функций, выполняемых над кривыми, например дифференцирование, интегрирование, нахождение максимума и минимума. Язык скриптов Inspect основан на Tcl и поэтому унаследовал его гибкость и функциональность.

Следует отметить, что для получения многооконных графиков, готовых для презентаций, рекомендуется использовать программный модуль Tesplot SV.

5.3.1. Запуск Inspect

Чтобы запустить Inspect, необходимо набрать в командной строке
> inspect

В качестве рабочего каталога Inspect примет текущий каталог.

Inspect также может быть запущен из Sentaurus Workbench или Tesplot SV.

После запуска на экране отобразится главное окно Inspect (рис. 5.9).

Главное окно содержит следующие компоненты:

- меню и панель инструментов;
- правую часть занимает область графиков, где отображаются кривые;
- левая часть имеет две области: **Datasets** (наборы данных) и **Curves** (кривые).

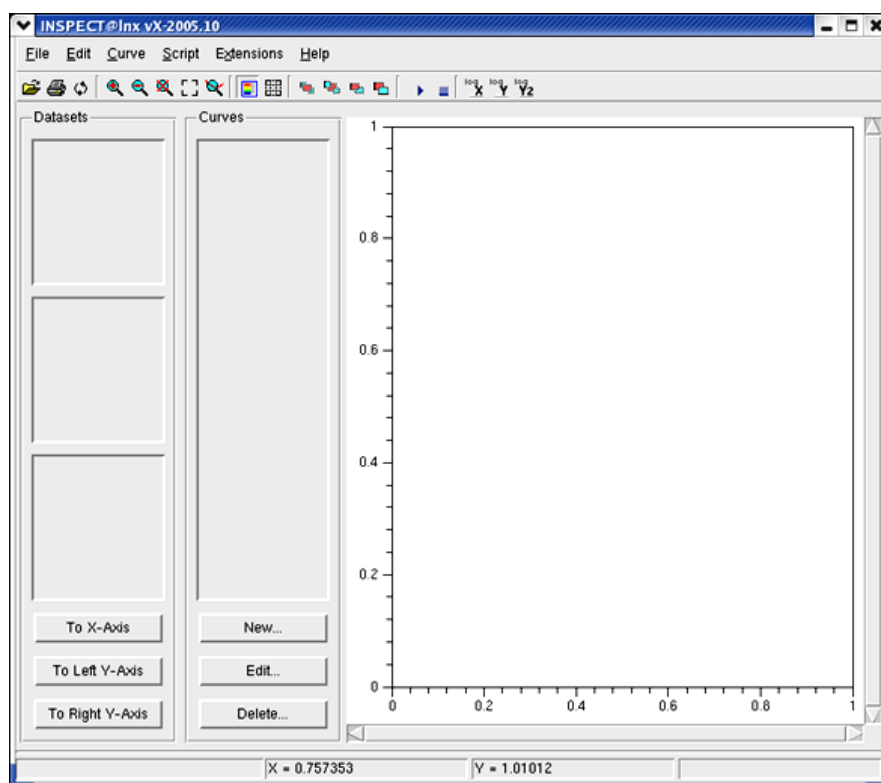


Рис. 5.9. Графический интерфейс пользователя Inspect

Область **Datasets** отображает загруженные файлы наборов данных с их компонентами. Кнопки **To X Axis**, **To Left Y Axis** и **To Right Axis**, расположенные под областью **Datasets**, используются для отображения наборов данных по соответствующим координатным осям.

Область **Curves** отображает имена существующих кривых; ниже расположены кнопки **New**, **Edit** и **Delete**; кнопка **New** предназначена для создания кривой с использованием библиотеки формул, кнопка **Edit** – для изменения параметров отображения кривой, а кнопка **Delete** удаляет выделенные кривые.

Строка состояния внизу окна отображает информацию о текущей сессии Inspect и положении указателя в области графиков.

5.3.2. Загрузка наборов данных

5.3.2.1. Форматы файлов

Перед отображением необходимо загрузить в Inspect файл, содержащий множество наборов данных. Файл может иметь формат DF-ISE .plt или простой формат столбцов. Файлы формата DF-ISE .plt обычно являются выходными файлами программного модуля Synopsys TCAD, в частности Sentaurus Device. Такой файл может называться, например, n1_des.plt.

Файл в простом формате столбцов должен начинаться со строки комментария в двойных кавычках, затем должны следовать два столбца данных:

```
«This is a comment line.»  
1 0.1  
2 0.5  
3 0.9  
...
```

5.3.2.2. Загрузка

Для загрузки наборов данных при запуске Inspect из командной строки наберите

```
> inspect n1_des.plt
```

n1_des.plt – имя файла, содержащего необходимые наборы данных, например ток стока с напряжением на затворе. Можно сразу загрузить более одного файла, перечислив их имена в командной строке, например:

```
> inspect n1_des.plt n2_des.plt n3_des.plt ...
```

Если сессия Inspect уже запущена, можно загрузить файлы, используя команду меню **File > Load Datasets** или щелкнув соответствующий значок в панели управления.

В результате Inspect откроет диалоговое окно **Load Dataset** (рис. 5.10), в котором можно ввести имена файлов или выбрать их в окне.

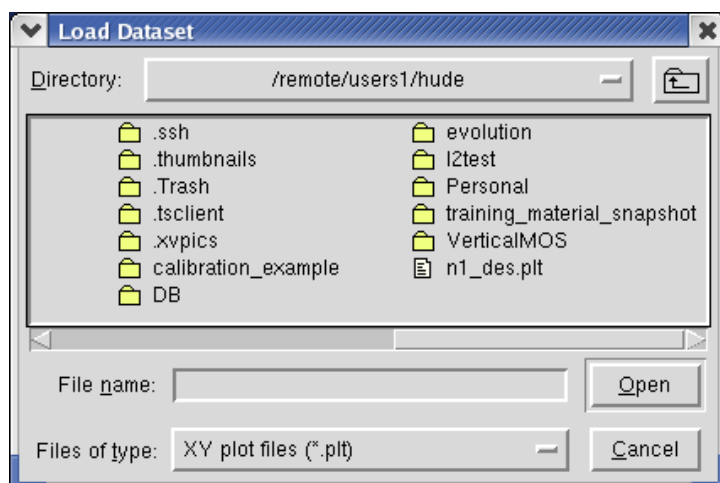


Рис. 5.10. Диалоговое окно

После того как файл наборов данных загружен, его имя отображается в области **Datasets**. В среднем поле области отображается список имен групп данных выбранного файла, а в нижнее поле – имена наборов данных, принадлежащих выбранной группе (рис. 5.11).

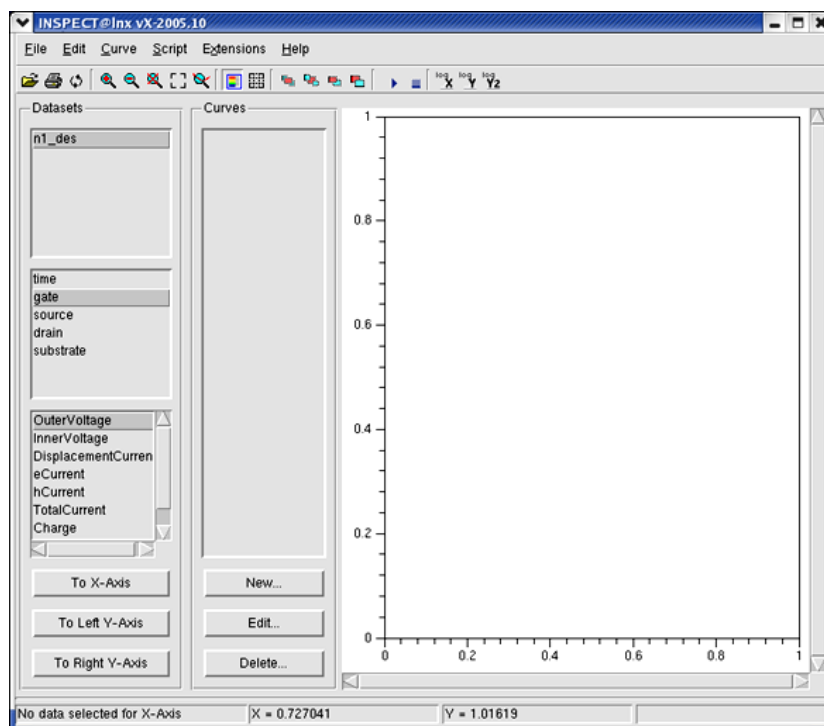


Рис. 5.11. Главное окно, содержащее информацию о наборах данных в области **Datasets**

5.3.3. Отображение наборов данных

Так как загруженный файл может содержать более двух наборов данных, Inspect не пытается автоматически определить по местоположению в файле, какие наборы следует отобразить по осям X и Y . Напротив, пользователь должен явно указать их после загрузки данных. Для этой цели служат кнопки **To X Axis**, **To Left Y Axis** и **To Right Y Axis**.

Например, чтобы отобразить по оси X на графике набор данных **OuterVoltage** из группы **gate** файла **n1_des**, необходимо выполнить следующие действия.

1. Выбрать файл данных **n1_des** в верхнем поле области **Datasets**.
2. Выбрать группу данных **gate** в среднем поле.
3. Выбрать набор данных **OuterVoltage** в нижнем поле.
4. Щелкнуть кнопку **To X Axis**.

5. Отображение по осям Y , левой и правой, может быть задано аналогичным образом щелчком по кнопкам **To Left Y axis** и **To Right Y axis**. (При необходимости можно отобразить более одного набора данных по одной оси Y .)

Для примера на рис. 5.12 изображен график зависимости тока стока (набор данных TotalCurrent из группы drain по левой оси Y) от напряжения на стоке (OuterVoltage по X).

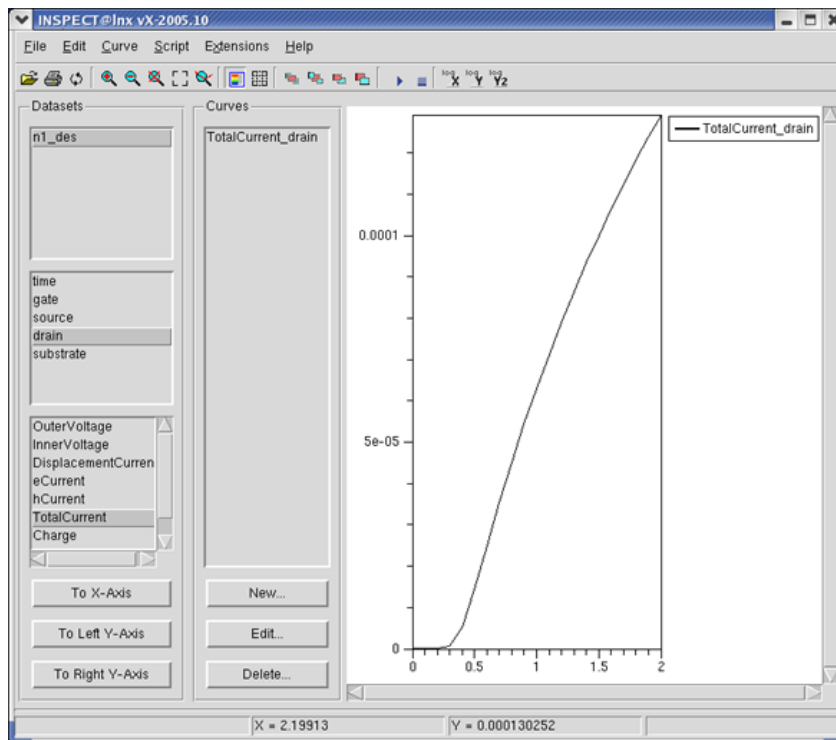


Рис. 5.12. График зависимости тока от напряжения на стоке

5.4. Sentaurus Workbench


Sentaurus Workbench является главной графической оболочкой, которая интегрирует программы моделирования в единую рабочую область. Она используется для разработки, организации и выполнения процесса моделирования.

Процессы моделирования комплексизируются в проекты. Sentaurus Workbench автоматически организует передачу информации, включая предварительную обработку входных файлов пользователя, параметризацию проектов, настройку и запуск экземпляров модулей и представление результатов.

Sentaurus Workbench позволяет определить параметры и переменные для выполнения комплексных параметризованных исследований (анализов). Полученные результаты могут быть затем обработаны с использованием статистического и табличного программного обеспечения.

5.4.1. Запуск Setaurus Workbench

Запуск Setaurus Workbench выполняется командной строкой: `swb`.

После запуска Setaurus Workbench отображает на экране главное окно (рис. 5.13), включающее содержимое рабочего каталога (выделено на рисунке синей рамкой). Проекты Setaurus Workbench отображаются значком  слева от их названия.

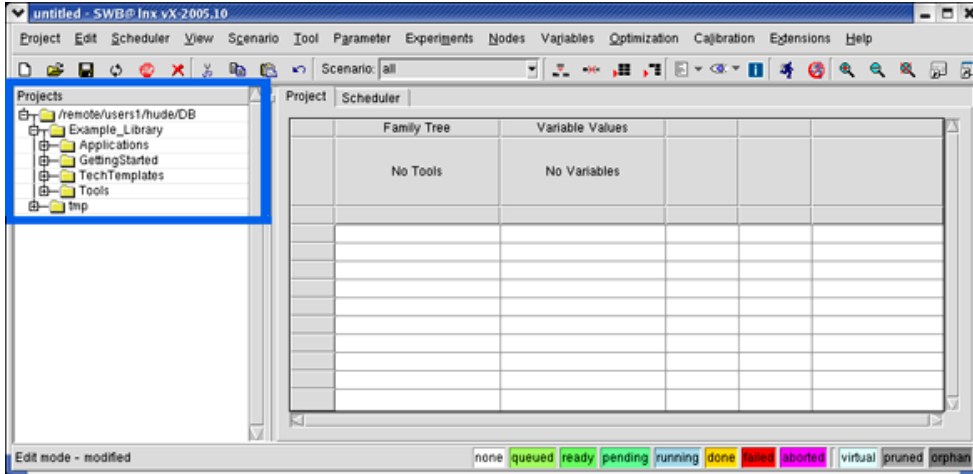


Рис. 5.13. Главное окно Setaurus Workbench

Для открытия существующего проекта необходимо дважды щелкнуть на его названии в рабочем каталоге.

Открытый проект отображается в правой части главного окна программы (рис. 5.14).

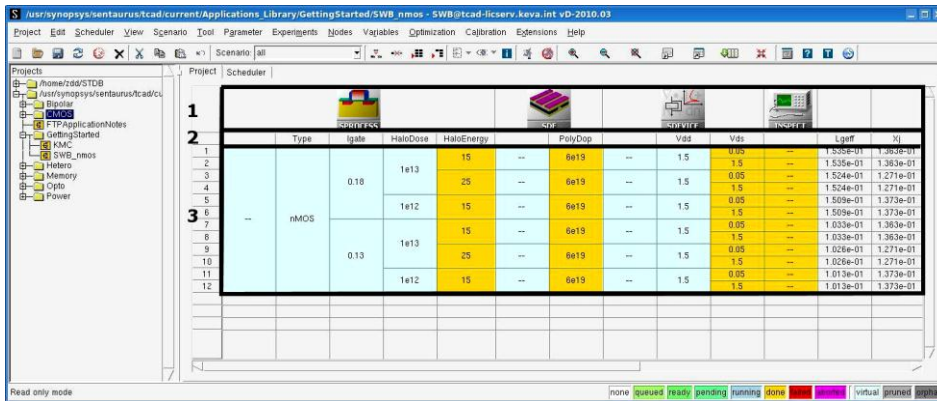


Рис. 5.14. Главное окно Setaurus Workbench, отображающее маршрут модулей (1), параметры (2) и узлы моделирования (3) – отмечены черной рамкой

Маршрут модулей представляет собой связанную последовательность программ моделирования, составляющих проект. В показанном примере это Sentaurus Process, Sentaurus Structure Editor, Sentaurus Device и Inspect (см. рис. 5.14). Ниже маршрута модулей отображаются узлы [n1], [n2] и т.д.

Включение отображения номеров узлов производится посредством команды главного меню **View > Tree Options > Show Node Numbers**.

Одна цепь узлов моделирования (по одному узлу для каждой программы в маршруте) составляет один эксперимент (experiment). При использовании параметров возможно создание произвольного числа экспериментов.

Справа от маршрута модулей отображаются переменные и экстрагированные (extracted) электрические параметры. После завершения моделирования экстрагированные значения появляются в соответствующих столбцах.

Чтобы узнать параметры любого узла, необходимо дважды щелкнуть на его ячейку в окне. При этом отображается диалоговое окно с информацией об узле (рис. 5.15).

В окне отображаются номер узла, соответствующий программный модуль, соответствующий параметр и его значение, статус узла, дата и время моделирования, имя компьютера, на котором было выполнено моделирование, и полное время продолжительности моделирования. Из перечисленного меняется только статус узла, который может использоваться в различных случаях для контроля процесса выполнения экспериментов.

Диалоговое окно также отображает экстрагированные и установленные переменные, показывает параметры от предыдущих шагов и их значения.

Каждый узел моделирования в проекте имеет цвет, который отображает его состояние (status). Диаграмма цветов в нижнем правом углу главного окна Sentaurus Workbench (рис. 5.16) показывает смысловое значение каждого цвета.

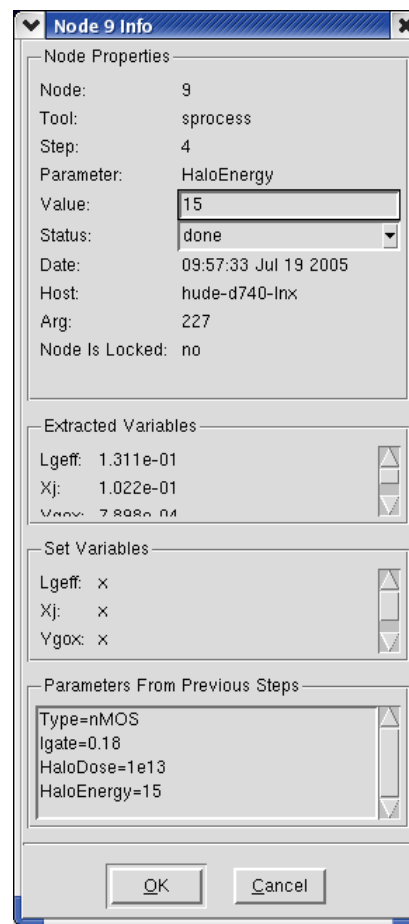


Рис. 5.15. Диалоговое окно с информацией об узле

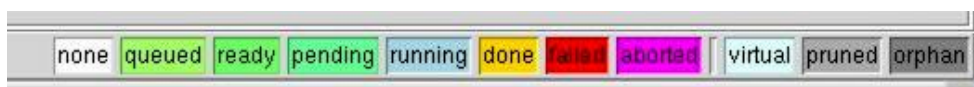


Рис. 5.16. Цвета, обозначающие различные состояния узлов

Например, в нашем случае, когда был открыт проект (см. рис. 5.14), узлы были желтого цвета. Это означает, что в прошлом моделирование этих узлов закончилось успешно.

Прежде чем запустить проект, может потребоваться удалить результаты предыдущего моделирования.

Для того чтобы очистить проект, необходимо выполнить следующие действия.

1. **Project > Clean Up.**

2. В диалоговом окне **Clean Up Options** (рис. 5.17) отметить элементы, подлежащие удалению.

3. Нажать **ОК**.

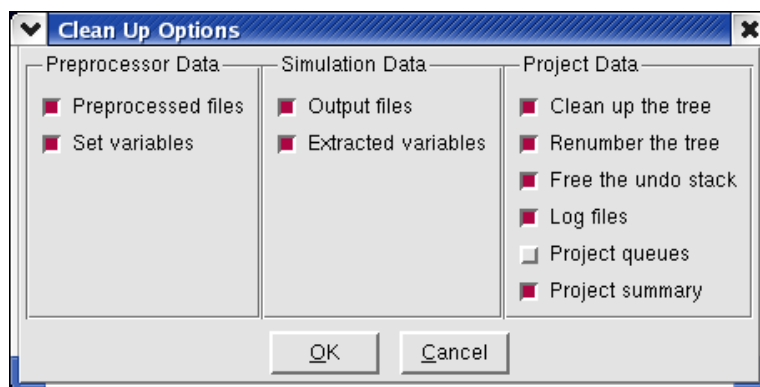


Рис. 5.17. Диалоговое окно **Clean Up Options**

В данном случае Sentaurus Workbench удалит все файлы, связанные с предыдущим запуском, что отразится в смене цвета узлов с желтого (выполнено – done) на белый (отсутствует – none).

5.4.2. Запуск проектов

Чтобы запустить расчет проекта, необходимо выполнить следующее.

1. Меню **Project > Run** или сочетание клавиш **Ctrl+R** (или щелкнуть на иконку **Run** в панели инструментов).

2. В диалоговом окне **Run Project** (рис. 5.18) щелкнуть **Run**, чтобы выполнить расчет всего проекта.

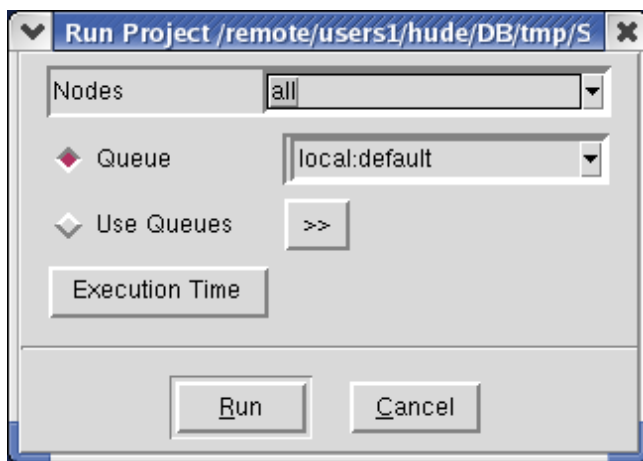


Рис. 5.18. Диалоговое окно **Run Project**

Если требуется рассчитать только несколько узлов, то в поле Nodes диалогового окна необходимо ввести их номера. Например, «15 16» – для расчета узлов 15 и 16.

Затем Sentauros Workbench производит расчет проекта, о чем свидетельствует появившееся диалоговое окно **Project Log** (рис. 5.19), которое отображает текущий статус расчета проекта.

После запуска расчета каждого узла Sentauros Workbench выводит сообщение, аналогичное следующему:

```
>>>>>>>>> job '10' status changed from 'pending'  
to 'running'  
09:34:49 Jul 19 2005 job 10 <sprocess> started on  
host 'hude-d740-lnx': «/remote/tcadprod/bin/sprocess -u n10_fps.cmd»
```

Перед выполнением расчета узла Sentauros Workbench осуществляет предварительную обработку входных файлов, что включает проверку синтаксиса и подстановку значений параметров и переменных. После успешной обработки файлов Sentauros Workbench создает готовые для расчета входные файлы, имеющие имена вида pp<node_number>_<tool_name>.cmd и pp<node_number>_des.par (файл параметров Sentauros Device).

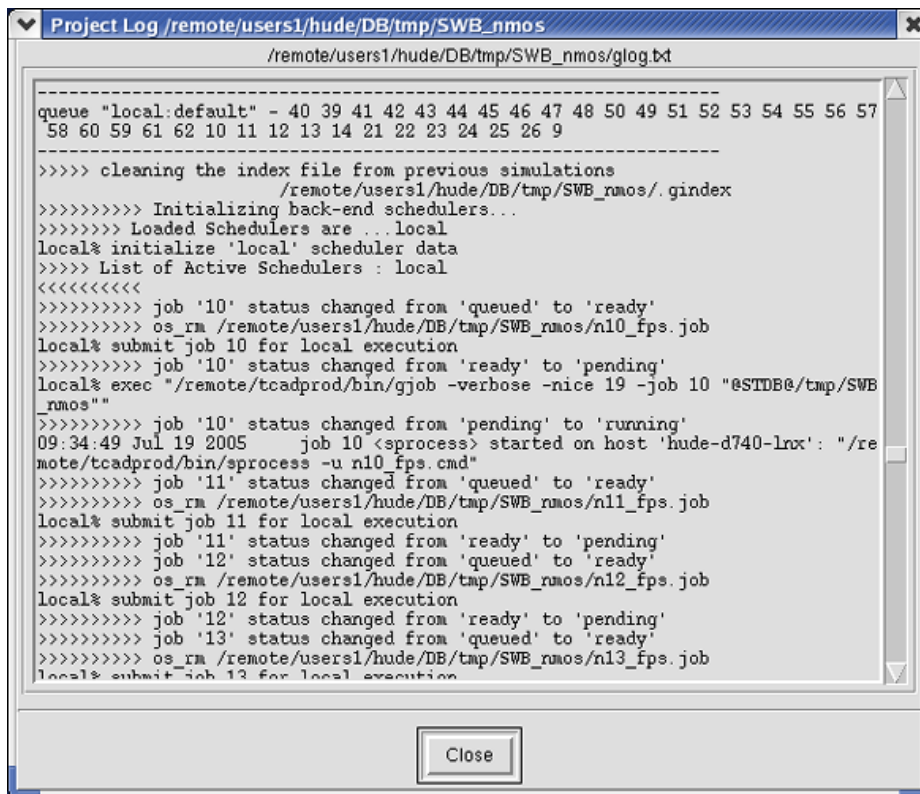


Рис. 5.19. Диалоговое окно **Project Log**

Когда расчет проекта успешно завершен, Sentaurus Workbench отображает следующее сообщение в диалоговом окне **Project Log**:

```

SCHEDULING REPORT
+++ done : 40 39 41 42 43 44 45 46 47 48 50 49 51 52 53 54 55 56 57 58
60 59 61 62 10 11 12 13 14 21 22 23 24 25 26 9
10:10:33 Jul 19 2005 <SWB_nmos> done (2146 sec)
>>>>> Writing to status file 2146
gsub exits with status 0

```

К этому моменту завершена экстракция всех переменных, значения которых отображаются справа от маршрута модулей в главном окне Sentaurus Workbench.

5.4.3. Отображение результатов

Каждый узел имеет набор соответствующих ему входных и выходных файлов, которые можно отобразить, щелкнув правой кнопкой мыши и выбрав **Visualize**. Для просмотра любого текстового файла или файла журнала необходимо выбрать его в списке.

Все выходные файлы данных Sentaurus Process – Mdraw, Sentaurus Device – могут быть отображены с помощью Tecplot SV, а файлы .plx и .plt Sentaurus Device – с помощью Inspect.

Дополнительно может быть отображена информация, записанная в стандартный выходной поток программы в процессе расчета. Для этого необходимо выбрать в контекстном меню узла **View Output** или щелкнуть на иконке



в панели задач.

5.4.4. Выбор узлов

Для произвольного узла в проекте могут быть выделены все узлы, предшествующие ему в эксперименте и следующие за ним. Это может быть сделано по состоянию узлов или инверсии их состояния. Такая возможность очень полезна, в особенности при управлении очень большими проектами с множеством параметров.

Приведем несколько примеров.

1. Click node 2. Щелкните на узле 2.
2. Выберите пункт меню **Nodes > Extend Selection To > Leaves**.
3. Затем **Nodes > Extend Selection To > Root**.
4. Очистить выделение: **Nodes > Deselect All**.
5. Измените состояние узла 9 с done на none.
6. Меню **Nodes > Select > By Status > done**. В результате только узел 9 остался не выделенным.

То же самое может быть достигнуто инверсным выделением:

- Меню **Nodes > Select > Inverse Of > none**.

5.4.5. Удаление проектов

Для удаления проекта:

- 1) выделите проект в окне проектов Projects;
- 2) щелкните правой кнопкой мыши и выберите **Delete**.

Если появится сообщение об ошибке (рис. 5.20), то проект необходимо закрыть перед его удалением.

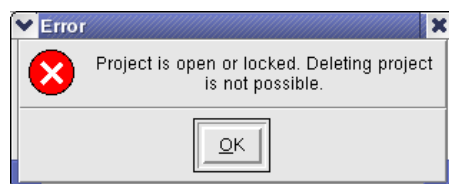



Рис. 5.20. Диалоговое окно сообщения об ошибке

В этом случае щелкните **OK** и выберите пункт меню **Project > Close**, в результате чего проект исчезнет с главного окна программы.

Теперь повторите пп. 1–2 и выберите **Yes** в появившемся диалоговом окне.

5.4.6. Создание проектов

Чтобы создать проект, выберите пункт меню **Project > New** или щелкните по значку  на панели инструментов.

Это создаст временный проект с именем, похожим на `g_inx_2879_0.tmp`, в папке `tmp`, который можно наблюдать в окне проектов `Projects` (рис. 5.21).

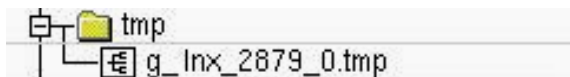


Рис. 5.21. Вновь созданный проект в дереве каталогов проектов

5.4.6.1. Создание маршрута модулей

Перед созданием маршрута модулей необходимо создать проект.

Например, наш маршрут будут составлять следующие модули в указанном порядке: `Sentaurus Process`, `Sentaurus Structure Editor`, `Sentaurus Device` и `Inspect`.

Для создания маршрута модулей щелкните правой кнопкой мыши на поле **No Tools** в столбце `Family Tree` (рис. 5.22) и выберите пункт **Add Tool** в появившемся контекстном меню.

	Family Tree	Variable Values
	No Tools	No Variables

Рис. 5.22. Часть главного окна, используемая для создания маршрута модулей

В результате на экране появится диалоговое окно **Add Tool** (рис. 5.23).

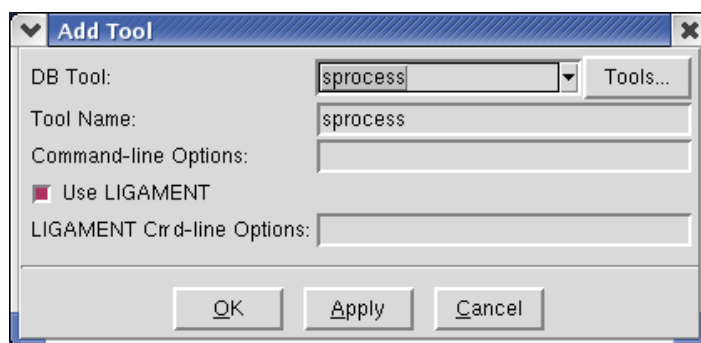


Рис. 5.23. Диалоговое окно **Add Tool**

Поле **Tool Name** задает имя, по которому можно обратиться к данному конкретному экземпляру модуля Sentaurus Process. Пользователь может задать здесь любое имя по своему усмотрению, оно не ограничивается sprocess, использованном в данном примере. (Возможность задания произвольных имен полезна, когда один и тот же программный модуль используется несколько раз в маршруте. В этих случаях первый экземпляр Sentaurus Process можно было бы назвать sprocess1, второй – sprocess2 и т.д. или использовать любые другие имена по усмотрению пользователя.)

В поле **DB Tool** выберите sprocess из списка модулей. Щелкните **OK**, чтобы закрыть диалоговое окно и добавить модуль в маршрут.

Отметьте параметр **Use Ligament**, в этом случае Sentaurus Process будет использовать входные файлы в формате Ligament.

Задайте, чтобы Sentaurus Process запускался в пакетном режиме (batch mode).

1. Щелкните правой кнопкой мыши на иконке Sentaurus Process и выберите пункт контекстного меню **Edit Input > Preferences**, чтобы отобразить диалоговое окно **Edit Preferences** (рис. 5.24).

2. Отметьте параметр **Start in batch mode**.

3. Щелкните **OK**.

Затем отобразится диалоговое окно **Create Default Experiment**, где может быть создан сценарий выполнения (рис. 5.25).

Чтобы задать имя сценария:

1) введите new в качестве имени сценария;

2) щелкните **OK**.

Теперь необходимо задать входные файлы для Sentaurus Process в формате Ligament. Можно импортировать их из учебного проекта SWB_nmos, поставляемого вместе с Synopsys TCAD.

Чтобы импортировать файлы:

1) щелкните правой кнопкой мыши на иконке Sentaurus Process и выберите пункт контекстного меню **Import File > Ligament Flow**;

2) в появившемся диалоговом окне **Import Flow File** перейдите в папку SWB_nmos в дереве каталогов и выделите sprocess_lig.cmd (рис. 5.26);

3) щелкните **Open**.

Аналогичным образом щелкните правой кнопкой мыши на иконку Sentaurus Process, выберите пункт контекстного меню **Import File > Ligament Layout** и импортируйте файл sprocess_lig.lyt. (Пользователь также может выполнить **Edit Input > Ligament Layout**, чтобы запустить Ligament Layout Editor и создать начальную структуру.) На этом добавление модуля Sentaurus Process полностью завершено.

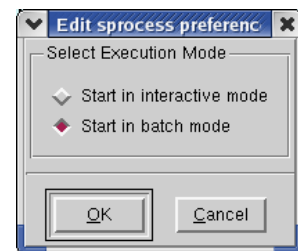


Рис. 5.24. Диалоговое окно **Edit Preferences** для Sentaurus Process

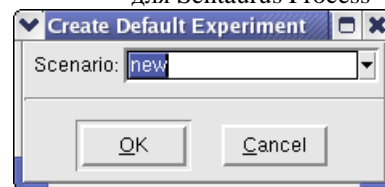


Рис. 5.25. Диалоговое окно **Create Default Experiment**

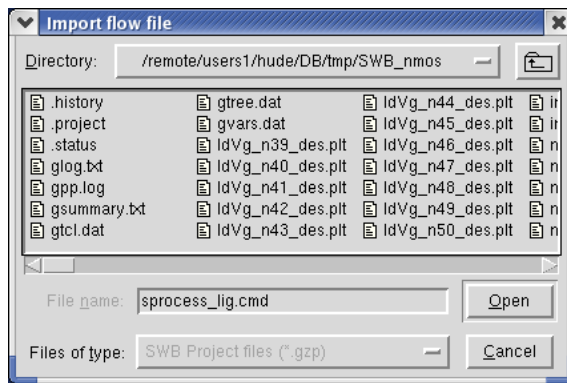


Рис. 5.26. Диалоговое окно **Import Flow File**

Чтобы добавить Sentaurus Structure Editor:

- 1) щелкните правой кнопкой мыши на иконке Sentaurus Process и выберите пункт контекстного меню **Add**;
- 2) в диалоговом окне **Add Tool** введите **sde** в поле **Tool Name** и выберите **sde** в поле **DB Tool**;
- 3) отметьте параметр **After Selected Tool**, чтобы добавляемый модуль следовал за Sentaurus Process (снимите отметку с параметра **Use Ligament**);
- 4) установите, чтобы Sentaurus Structure Editor запускался в пакетном режиме, щелкнув правой кнопкой мыши иконку Sentaurus Structure Editor и выбрав **Edit Input > Preferences**, чтобы запустить диалоговое окно **Edit Preferences**;
- 5) отметьте параметр **Start in batch mode** (рис. 5.27).

Теперь необходимо задать командный файл для Sentaurus Structure Editor. Аналогично, как для Sentaurus Process, щелкните иконку Sentaurus Structure Editor и выберите **Import File > Commands**, в появившемся диалоговом окне найдите папку SWB_nmos и выберите **sde_dvs.cmd**.

Чтобы добавить Sentaurus Device:

- 1) выполните шаги 1–5, как для Sentaurus Structure Editor, но замените **sde** на **sdevice** в качестве имени модуля;
- 2) выберите **sdevice** в поле **DB tool**;
- 3) импортируйте **sdevice_des.cmd** в качестве входного файла.

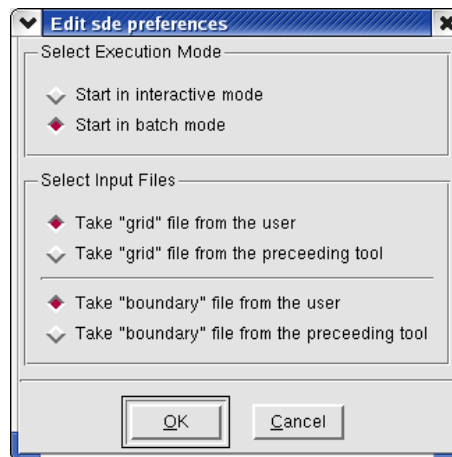


Рис. 5.27. Диалоговое окно **Edit Preferences** для Sentaurus Structure Editor

Аналогично выберите **Import File > Parameter (Si Model)**, найдите папку SWB_nmos и выберите файл параметров sdevice.par.

Чтобы добавить Inspect:

- 1) повторите те же шаги, что и для Sentaurus Device, но замените sdevice на inspect в качестве имени модуля;
- 2) выберите inspect в поле DB tool;
- 3) импортируйте inspect_ins.cmd в качестве входного файла;
- 4) выберите **Edit Input > Preferences** и отметьте параметр **Start in batch mode**;
- 5) щелкните **ОК**.

5.4.6.2. Сохранение проектов

Когда проект составлен, его необходимо сохранить.

1. Выберите пункт меню **Project > Save As**.
2. Выберите папку, где необходимо сохранить проект.
3. Сохраните проект под именем SWB_nmos_example.

5.4.7. Выполнение экспериментов

5.4.7.1. Добавление параметров

Sentaurus Workbench позволяет добавить параметры и задать множество присваиваемых им значений для создания дерева экспериментов. Каждое значение параметра добавляет один эксперимент, поэтому для N значений параметра будет создано N экспериментов. Для двух параметров $P1$ и $P2$, имеющих соответственно M и N значений, будет создано $M \times N$ возможных экспериментов.

Покажем на примере использование параметров для Sentaurus Process, Sentaurus Structure Editor и Sentaurus Device. Пусть для Sentaurus Process задаются параметры:

- имя структуры в параметре Type;
- значение длины затвора (параметр lgate);
- значение дозы имплантации галогенов (параметр HaloDose);
- значение энергии имплантируемых галогенов (параметр HaloEnergy).

Для Sentaurus Structure Editor задается значение концентрации примесей в области polygate (параметр PolyDop).

Для Sentaurus Device задаются параметры:

- начальное значение напряжения, подаваемого на затвор (параметр Vdd);
- значение напряжения на стоке (параметр Vds).

Чтобы создать каждый параметр (например, Type в Sentaurus Process), необходимо выполнить следующие действия.

1. Щелкните правой кнопкой мыши в сером прямоугольнике, расположенном прямо под иконкой Sentaurus Process в главном окне Sentaurus Workbench, и выберите пункт контекстного меню **Add**.

2. В диалоговом окне **Add Parameter** заполните поля, как показано на рис. 5.28.

3. Щелкните **ОК**.

Чтобы добавить остальные параметры, выполните следующее.

1. Щелкните правой кнопкой на узел **Type** и выберите **Add**.

2. В диалоговом окне **Add Parameter** введите имя параметра **Igate** и значение по умолчанию **0,18**.

3. Повторите эти шаги для параметра **HaloDose** со значением по умолчанию **1e13** и для **HaloEnergy** со значением **15**.

Теперь под иконкой **Sentaurus Structure Editor** добавьте параметр **PolyDop** со значением по умолчанию **6e19**.

Затем под иконкой **Sentaurus Device** добавьте параметр **Vdd** со значением по умолчанию **1,5** и **Vds** со значением **0,05**.

Главное окно **Sentaurus Workbench** должно принять вид, показанный на рис. 5.29.

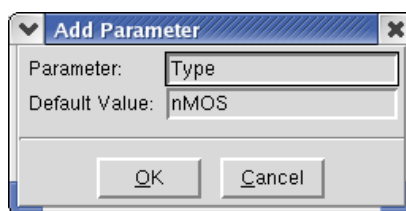


Рис. 5.28. Диалоговое окно **Add Parameter**

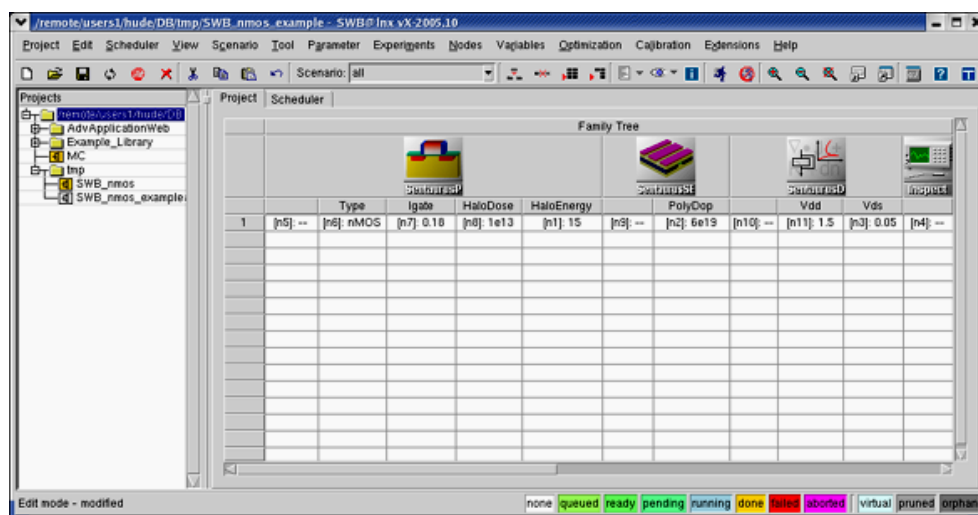


Рис. 5.29. Главное окно **Sentaurus Workbench** с добавленными параметрами

Чтобы проверить, например, что параметр добавлен во входной файл **Sentaurus Structure Editor sde_dvs.cmd**, щелкните правой кнопкой на иконку **Sentaurus Structure Editor** и выберите **Edit Input > Commands**, чтобы открыть файл **sde_dvs.cmd**.

```
(define PolyDop @PolyDop@)
```

Для **Sentaurus Device** **Vdd** и **Vds** были добавлены следующим образом:

```
{ Name=«gate» Voltage=! (puts [expr $SIGN*@Vdd@])! }  
{ Name=«drain» Voltage=! (puts [expr $SIGN*@Vds@])! }
```

Конструкции @PolyDop@, @Vdd@ и @Vds@ показывают, что это параметры, которые во время предварительной обработки будут заменены реальными значениями, заданными в определениях параметров. Значения всех параметров, добавленных в этом проекте, отображаются в файле предварительной обработки.

Чтобы выполнить предварительную обработку проекта, активируйте пункт меню **Project > Preprocess** или горячее сочетание клавиш Ctrl+P и посмотрите результаты (рис. 5.30).

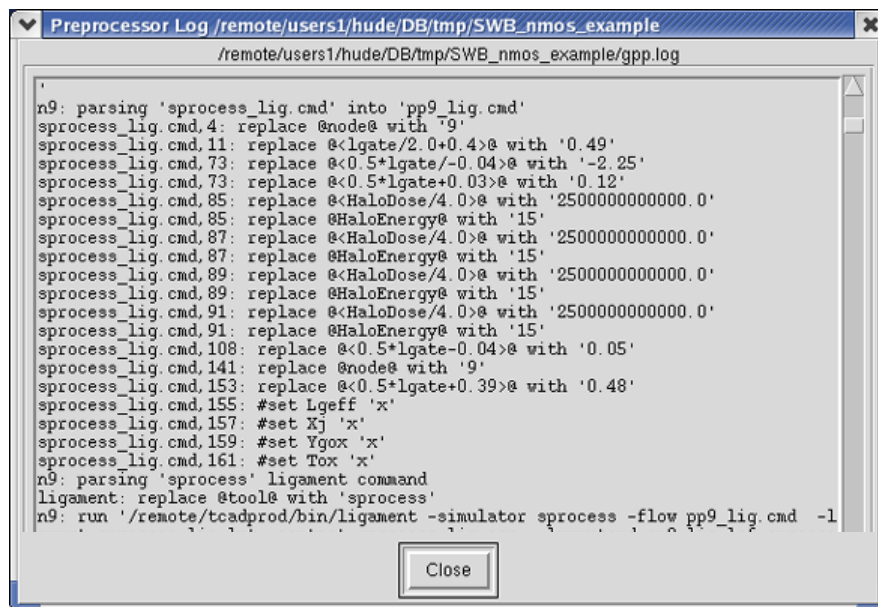


Рис. 5.30. Диалоговое окно **Preprocessor Log**

5.4.7.2. Создание множества экспериментов

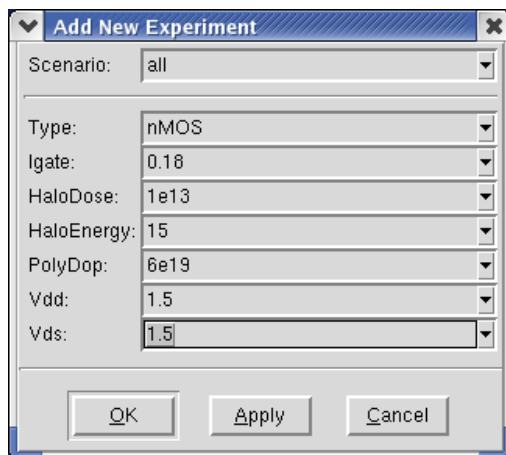


Рис. 5.31. Диалоговое окно

Чтобы со- **Add New Experiment dialog box** здать мно-
 жество экспериментов, выполните следующее.

1. Активируйте пункт меню **Experiments > Add New Experiment**.
2. Введите значения, как показано на рис. 5.31.

Повторите эти действия, указывая следующие значения:

Experiment 3 Type : nMOS Igate : 0.18 HaloDose : 1e13 HaloEnergy : 25 PolyDop : 6e19 Vdd : 1.5 Vds : 0.05	Experiment 4 Type : nMOS Igate : 0.18 HaloDose : 1e13 HaloEnergy : 25 PolyDop : 6e19 Vdd : 1.5 Vds : 1.5	Experiment 5 Type : nMOS Igate : 0.18 HaloDose : 1e12 HaloEnergy : 15 PolyDop : 6e19 Vdd : 1.5 Vds : 0.05
Experiment 6 Type : nMOS Igate : 0.18 HaloDose : 1e12 HaloEnergy : 15 PolyDop : 6e19 Vdd : 1.5 Vds : 1.5	Experiment 7 Type : nMOS Igate : 0.13 HaloDose : 1e13 HaloEnergy : 15 PolyDop : 6e19 Vdd : 1.5 Vds : 0.05	Experiment 8 Type : nMOS Igate : 0.13 HaloDose : 1e13 HaloEnergy : 15 PolyDop : 6e19 Vdd : 1.5 Vds : 1.5
Experiment 9 Type : nMOS Igate : 0.13 HaloDose : 1e13 HaloEnergy : 25 PolyDop : 6e19 Vdd : 1.5 Vds : 0.05	Experiment 10 Type : nMOS Igate : 0.13 HaloDose : 1e13 HaloEnergy : 25 PolyDop : 6e19 Vdd : 1.5 Vds : 1.5	Experiment 11 Type : nMOS Igate : 0.13 HaloDose : 1e12 HaloEnergy : 15 PolyDop : 6e19 Vdd : 1.5 Vds : 0.05
Experiment 12 Type : nMOS Igate : 0.13 HaloDose : 1e12 HaloEnergy : 15 PolyDop : 6e19 Vdd : 1.5 Vds : 1.5		

Когда все эксперименты добавлены, очистите проект следующим образом.

Активируйте пункт меню **Project > Clean Up** и задайте необходимые параметры (рис. 5.32).

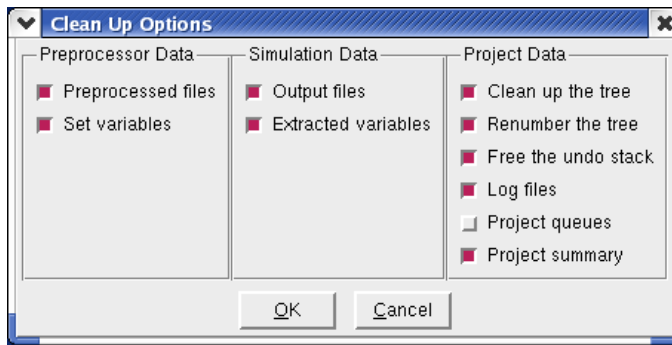


Рис. 5.32. Диалоговое окно **Clean Up Options**

Главное окно Sentaurus Workbench должно выглядеть так, как показано на рис. 5.33.

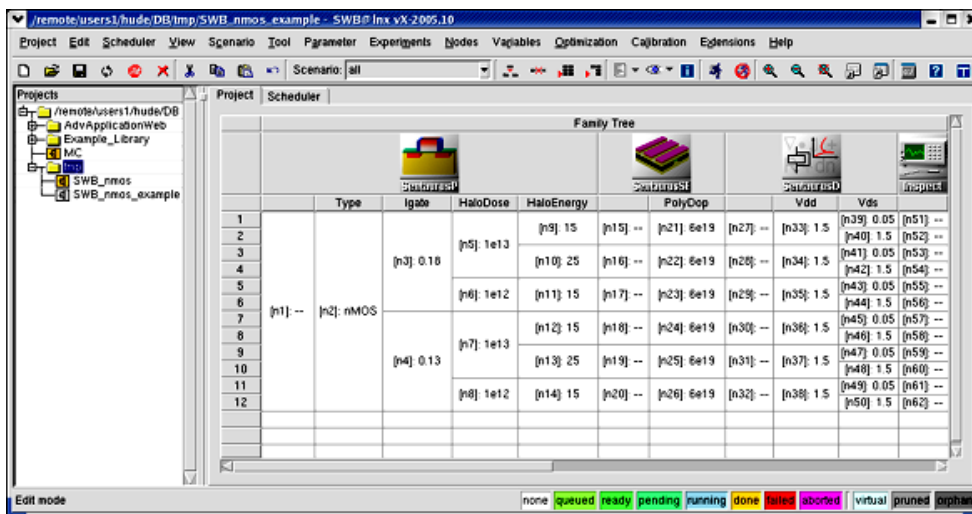


Рис. 5.33. Главное окно с экспериментами

Если необходимо добавить ряд значений параметра с определенным шагом, щелкните правой кнопкой на имя параметра и выберите **Add Values**, затем введите значения, как показано на рис. 5.34.

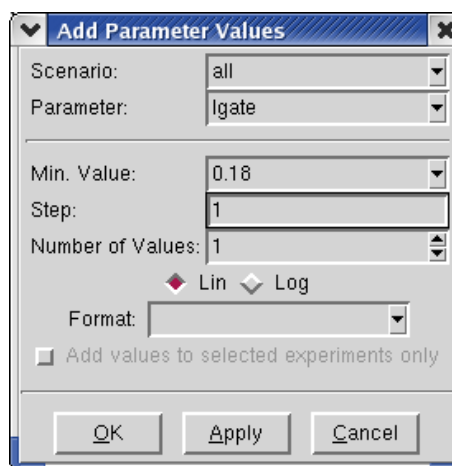


Рис. 5.34. Диалоговое окно
Add Parameter Values

5.4.7.3. Предварительная обработка и запуск проектов

Когда создание проекта завершено, проверьте его работоспособность посредством предварительной обработки файлов.

Чтобы осуществить предварительную обработку, активируйте пункт меню Project > Preprocessing or Ctrl+P.

Когда предварительная обработка успешно завершена, запустите проект: **Project > Run**.

После расчета последнего узла экстрагированные значения попадают в таблицу дерева семейств и отображаются в главном окне.

6. ПРИМЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ SYNOPSIS TCAD

6.1. Пример 1. Полупроводниковый резистор на полуизолирующей подложке GaAs

В данном примере рассмотрим создание проекта моделирования полупроводникового резистора, изготовленного на полуизолирующей подложке из арсенида галлия. Для упрощения модели не будем рассматривать эффекты генерации и рекомбинации носителей заряда в структуре, а также эффекты, связанные с саморазогревом прибора.

Резистор состоит из равномерно легированного эпитаксиального слоя арсенида галлия толщиной 0,1 мкм, выращенного на полуизолирующем буферном слое (ненамеренное легирование 10^{14} см^{-3} *p*-типа) арсенида галлия. Области омических контактов истока и стока легированы до уровня 10^{19} см^{-3} с целью обеспечения хорошего омического контакта. Для уменьшения геометрических размеров структуры сама полуизолирующая подложка не рассматривается.

Целью моделирования является получение вольт-амперных характеристик резистора, а также расчет распределения напряженности электрического поля в структуре для определения места, где вероятнее всего произойдет пробой полупроводника.

6.1.1. Создание нового проекта и задание структуры устройства

Запустите Sentaurus Workbench и создайте новый проект. Затем добавьте в него программный модуль Mesh. Щелкните правой кнопкой мыши по добавленному значку и выберите пункт меню Edit input > Boundary... Запустится программный модуль Sentaurus Structure Editor (SDE).

Для задания границ устройства включите режим точных координат (Exact Coordinates), выберите в качестве материала арсенид галлия (GaAs)

и нарисуйте прямоугольник с углами в точках (0;0) и (3;2), данная прямоугольная область будет представлять сечение резистора плоскостью X–Y. После создания основной области необходимо выделить области канала и омических контактов. Для этого выберите в пункте меню Mesh > Define Ref/Eval Window > Rectangle и задайте прямоугольную область с углами в точках (0; 0) и (3; 0,1) – это будет область канала. Для задания областей омических контактов проделайте эту же процедуру, создав прямоугольные области с координатами (0; 0), (0,5; 0,3) и (2,5; 0), (3; 0,3).

После того как обозначены границы устройства и его области, необходимо обозначить уровни легирования заданных областей. Сначала задайте легирование полуизолирующей области структуры. Для этого выберите пункт меню Device > Constant Profile Placement... В открывшемся диалоговом окне в секции Placement Type выберите Region > region_1, в секции Constant Profile Definition задайте имя (Name) Background и концентрацию (Concentration) $1e14$, в поле Species нужно оставить BoronActiveConcentration, так как заданная примесь имеет *p*-тип легирования. Нажмите кнопку Add Placement, после этого создастся профиль фонового легирования структуры. Для создания профиля легирования канала измените Placement Name на ConstantProfilePlacement_2, выберите в Placement Type вариант Ref/Eval Window, а напротив него укажите Ref/EvalWin_1 (это обозначение области канала). В Constant Profile Definition задайте имя Channel, в качестве легирующей примеси (Species) выберите ArsenicActiveConcentration (дает примесь *n*-типа) и уровень легирования $3.5e17$. Уровни легирования областей омических контактов задайте самостоятельно.

Когда уровни легирования областей заданы, нужно задать параметры генерации сетки. Для упрощения задачи ограничимся заданием грубой сетки в области полуизолирующего буферного слоя и второй, более детальной, сетки в области активного слоя. Для того чтобы задать параметры сетки в какой-либо области устройства, необходимо открыть диалоговое окно, выбрав пункт меню Mesh > Refinement Placement..., задать имя создаваемой сетки (Placement Name), задать область, в которой эта сетка будет расположена (Placement Type), ввести размеры максимального и минимального элемента сетки в каждом направлении (Max Element Size и Min Element Size) и нажать кнопку Add Placement. Для задания грубой сетки в качестве области выберите Region > region_1, а максимальный и минимальный размер элементов в каждом направлении задайте 0,05. После этого задайте мелкую сетку с шагом 0,01 в области Ref/Eval Window > RefEvalWin_1.

Завершающим шагом создания структуры является задание контактных областей. Для того чтобы добавить контактные области на верхнюю часть канала резистора, необходимо обозначить размеры этих областей. Для отделения областей контактов от остальной поверхности канала добавьте в структуру две вершины (кнопка Add Vertex) с координатами (0,5; 0) и (2,5; 0). После этого зайдите в диалоговое окно Contacts > Contact Sets, введите имя контакта (Contact Name) source и нажмите кнопку Set, затем выберите вновь созданный контакт в левом окошке и нажмите кнопку Activate, закройте диалоговое окно. Для задания местоположения контакта установите уровень вы-

деления – край полигона (Selection Level > Edge в контекстном меню), выберите область истока (после выбора область выделяется толстой оранжевой линией) и нажмите Contacts > Set Contact – выделенная область должна окраситься в красный цвет. Таким же образом создайте контакт к стоку транзистора (имя контакта должно быть drain).

После того как структура создана, необходимо ее сохранить. Выберите пункт меню File > Save Model As... Введите в качестве имени сохраняемого файла mesh_msh.cmd. После этого выберите File > Save Boundary As... и сохраните файл под именем mesh_msh.bnd. Задание этих имен необходимо, чтобы Sentaurus Workbench смог автоматически использовать их при процедуре предварительной обработки.

Закройте Sentaurus Structure Editor и вернитесь в окно проекта SWB. Запустите первый узел проекта. Если все было сделано правильно, то процесс создания сетки пройдет успешно и узел окрасится в желтый цвет.

6.1.2. Создание командного файла Sentaurus Device

После того как задана структура устройства и создана сетка, на которой будет решаться ФСУ, необходимо написать командный файл для Sentaurus Device. В проекте SWB добавьте программный модуль sdevice, щелкните на добавленный значок правой кнопкой мыши и выберите Edit Input > Commands... Так как писать командный файл с нуля достаточно долго, рекомендуется использовать шаблон, изменяя который, можно добиться требуемых результатов. В качестве шаблона можно использовать, например, такой файл:

```
File {
  Grid = «@grid@»
  Doping=«@doping@»

  Plot = «@dat@»
  Current = «@plot@»
  Output = «@log@»
}

Electrode {
  { Name=«source» Voltage=0.0 }
  { Name=«drain» Voltage=0.0}
  { Name=«gate» Voltage=0.0 Barrier=-0.55 }
}

Physics {
  Mobility (DopingDependence HighFieldSat Enormal)
  EffectiveIntrinsicDensity (BandGapNarrowing (OldSlotboom))
}

Plot {
  eDensity hDensity eCurrent hCurrent
  Potential SpaceCharge ElectricField
  eMobility hMobility eVelocity hVelocity
```

```

Doping DonorConcentration AcceptorConcentration
}
Math {
  Extrapolate
  RelErrControl
}
Solve {
  #-initial solution:
  Poisson
  Coupled { Poisson Electron }
  #-ramp gate:
  Quasistationary (
    Goal{ Name=«gate» Voltage=2 } )
    { Coupled { Poisson Electron } }
}

```

Секцию File оставим без изменений, так как в качестве имен входных и выходных файлов указаны названия переменных. SWB сам подставит нужные имена при процедуре предварительной обработки.

В секции Electrode необходимо убрать отсутствующий в структуре электрод с именем gate. Так как при создании структуры нами были использованы имена электродов source и drain, то две первые строчки останутся без изменений. Итоговая секция Electrode будет выглядеть следующим образом:

```

Electrode {
  { Name=«source» Voltage=0.0 }
  { Name=«drain» Voltage=0.0 }
}

```

Для максимального упрощения физической секции ограничимся моделью подвижности, зависящей от температуры и концентрации легирующей примеси в полупроводнике (DopingDependence), а также моделью насыщения скорости электронов в сильных электрических полях (HighFieldSaturation). После включения данных моделей секция примет вид

```

Physics {
  Mobility (DopingDependence HighFieldSaturation)
}

```

Секции Plot и Math оставим без изменений.

В секцию Solve необходимо внести следующие изменения. Так как целью моделирования является получение зависимости тока стока от напряжения на стоке, то необходимо изменить имя электрода, на который будет подаваться напряжение. Изменив имя gate на drain и увеличив напряжение до 5 В, получим:

```

Solve {
  #-initial solution:
  Poisson
  Coupled { Poisson Electron }
  Quasistationary (

```

```
Goal{ Name=«drain» Voltage=5 }  
{ Coupled { Poisson Electron } }  
}
```

Командный файл готов. Сохраните его и запустите процесс моделирования. Если все было сделано правильно, то после завершения расчета соответствующий узел проекта станет желтого цвета.

6.1.3. Результаты моделирования

Для просмотра результатов моделирования щелкните правой кнопкой мыши на последнем узле и выберите Visualize > .plt Files > Inspect. Постройте график зависимости drain(TotalCurrent) от drain(OuterVoltage) (рис. 6.1). Нетрудно убедиться, что полученная кривая имеет омический участок и участок насыщения, т.е. полностью соответствует ВАХ полупроводникового резистора. В качестве самостоятельного упражнения можно убрать модель насыщения скорости электронов в сильных электрических полях из командного файла и посмотреть, какая ВАХ получится в этом случае.

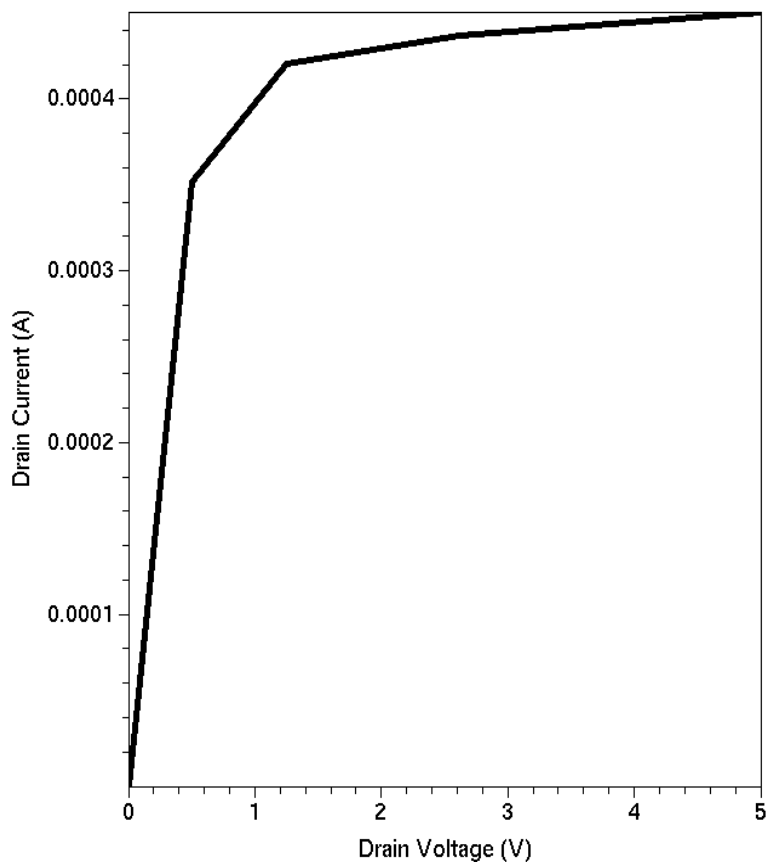


Рис. 6.1. Расчетная ВАХ полупроводникового резистора

Чтобы отобразить распределение напряженности электрического поля по структуре, щелкните правой кнопкой мыши на узле и выберите пункт Visualize > .dat Files (Tecplot SV). В открывшемся окне выберите переменную с именем ElectricField (рис. 6.2). Как видно из рисунка, максимальная напряженность электрического поля располагается в области стока, именно в этом месте и начнет происходить пробой структуры.

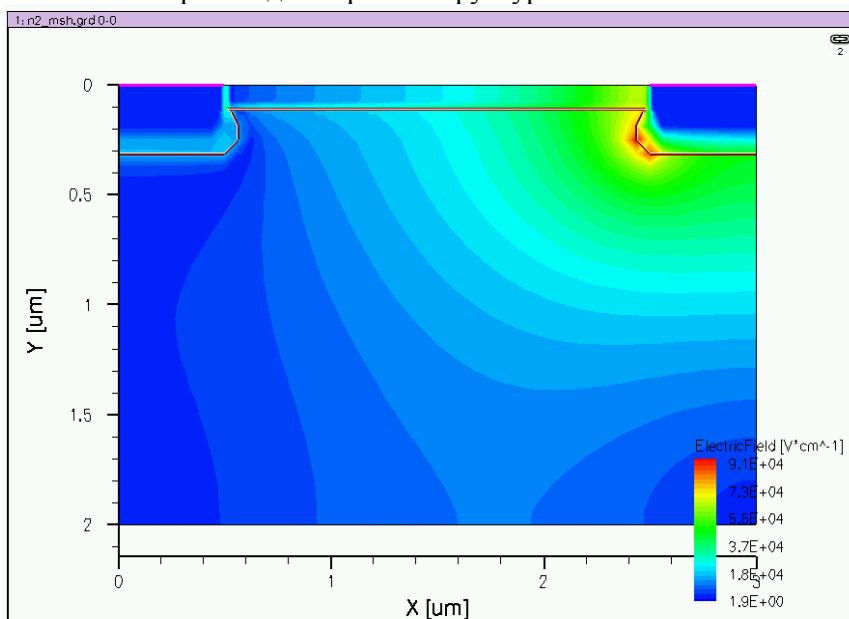


Рис. 6.2. Расчетное распределение напряженности электрического поля

6.2. Пример 2. Диод Шоттки на подложке GaAs

В данном примере рассмотрим процедуру моделирования диода Шоттки на основе контакта металл – арсенид галлия. Для выполнения этого примера необходим проект SWB, созданный в ходе работы над примером 1. Заданная в примере 1 структура будет дополнена путем добавления контакта Шоттки на поверхность полупроводникового резистора.

Целью моделирования является получение прямой и обратной ветвей диодной ВАХ. В дополнение к этому рассмотрим область контакта металл – полупроводник при прямом и обратном смещении на затворе.

6.2.1. Модификация структуры прибора

Откройте созданный ранее проект SWB и сохраните его под другим именем. После этого запустите SDE для редактирования файла *.bnd инструмента Mesh, как это было описано в предыдущем примере. Для того чтобы добавить контакт Шоттки на поверхность полупроводника между истоком и стоком, необходимо создать две точки (Add Vertex) с координатами (1,25; 0)

и (1,75; 0). После добавления точек создайте контакт с именем gate и расположите его между точками. Сохраните получившуюся структуру. По сути, полученный прибор является полевым транзистором, в процессе моделирования напряжение на стоке и истоке транзистора будет поддерживаться равным нулю, что соответствует так называемому диодному включению транзистора.

6.2.2. Модификация командного файла *Sentaurus Device*

Вернитесь в окно проекта SWB и откройте для редактирования командный файл SDevice. Добавьте в секцию Electrode описание электрода gate. Так как контакт не является омическим, то в его описание необходимо добавить высоту барьера и указать, что будет использоваться модель Шоттки. Итоговая секция Electrode будет иметь следующий вид:

```
Electrode {  
  { Name=«source» Voltage=0.0 }  
  { Name=«drain» Voltage=0.0 }  
  { Name=«gate» Voltage=0.0 Schottky Barrier=0.7 }  
}
```

Внесение изменений в секции Physics, Plot и Math не требуется.

Для того чтобы получить ВАХ диода, необходимо приложить к нему прямое и обратное напряжение. Измените секцию Solve так, чтобы она выглядела следующим образом:

```
Solve {  
  #-initial solution:  
  Poisson  
  Coupled { Poisson Electron }  
  
  Quasistationary ( MaxStep=0.02  
    Goal{ Name=«gate» Voltage=@Vg@ }  
    { Coupled { Poisson Electron } }  
  }  
}
```

Команда MaxStep задает максимальный шаг (относительный), с которым будет изменяться напряжение на затворе. Например, при конечном напряжении 1 В шаг будет равен $1 \cdot 0,02 = 0,02$ В.

Еще одним изменением данной секции командного файла является задание конечного напряжения не константой, а переменной @Vg@. Значения переменной будут заданы в проекте SWB и перед запуском SDevice записаны в командный файл.

Сохраните командный файл и вернитесь в окно проекта SWB. Для того чтобы задать значения переменной @Vg@, щелкните правой кнопкой мыши по серому прямоугольнику под инструментом Sdevice и выберите пункт Add... В появившемся диалоговом окне в строке Parameter введите имя переменной Vg, в строке Default Value введите -1. В проекте появилась новая переменная, имеющая значение -1. Это максимальный уровень обратного напряжения (в вольтах), которое будет подаваться на диод. Для того чтобы задать максимальный уровень прямого напряжения, щелкните правой кнопкой мыши по переменной и выберите в меню пункт Add Values... В появившемся диалоговом окне задайте следующие параметры: Min. Value = -1,

Step = 2, Number of Values = 2. Теперь в проекте переменная Vg имеет два значения: -1 и 1. Выделите эти значения мышью и запустите расчет.

6.2.3. Результаты моделирования

После того как расчет будет завершен, откройте файл *.plt, соответствующий напряжению -1 В, и постройте график зависимости gate(TotalCurrent) от gate(OuterVoltage). Как видно из графика, при подаче отрицательного смещения через диод протекает небольшой обратный ток (ток имеет знак минус). Для того чтобы загрузить файл с данными, полученными при прямом смещении, откройте файл n6_des.plt (File > Load Dataset...) и постройте ВАХ на уже имеющемся графике. Как видно из рисунка, ток остается малым до значений прямого напряжения 0,5–0,6 В. После того как прямое напряжение становится больше высоты барьера Шоттки (0,7 В), ток через диод начинает резко возрастать. Нетрудно убедиться, что полученная ВАХ соответствует ВАХ диода (рис. 6.3).

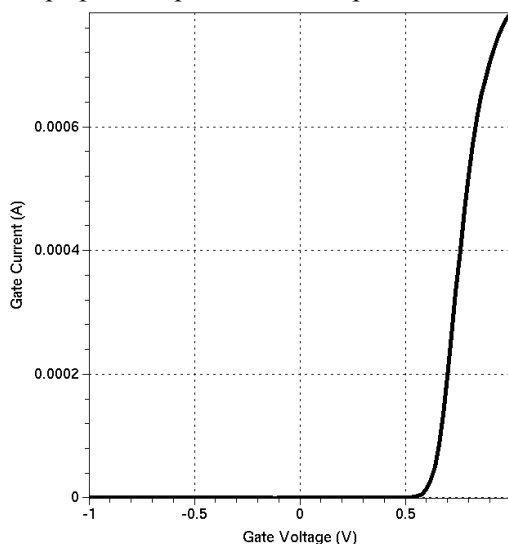


Рис. 6.3. Расчетная ВАХ диода Шоттки

Для детального рассмотрения области контакта металл – полупроводник откройте соответствующие файлы *.dat в программном модуле Tecplot. Выведите на экран значение переменной eDensity (рис. 6.4).

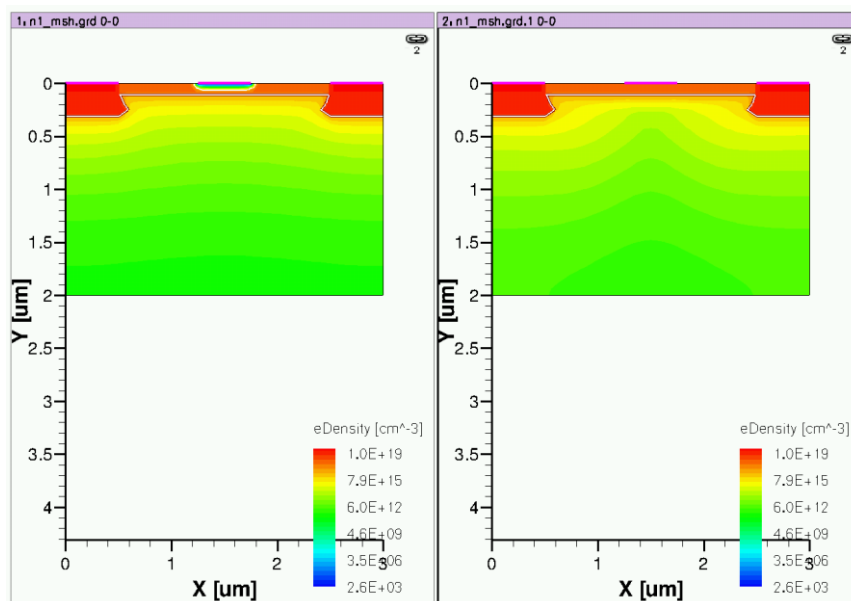


Рис. 6.4. Расчетная концентрация электронов для обратного (слева) и прямого (справа) включения диода

Как видно из рисунков, при отрицательном смещении под контактом gate образовалась область обеднения, концентрация электронов в которой составляет менее 10^4 cm^{-3} , а при положительном смещении концентрация основных носителей заряда под контактом примерно равна концентрации легирующей примеси. Данные наблюдения объясняют полученную форму ВАХ.

6.3. Пример 3. Полевой транзистор Шоттки на подложке GaAs

Целью этого примера является создание физической модели полевого транзистора Шоттки (ПТШ) на основе арсенида галлия. В ходе расчета будут получены ВАХ, а также изучены некоторые физические явления, происходящие внутри транзистора.

Для успешного выполнения примера необходимо наличие проекта, созданного в примере 2, модификация структуры не требуется, изменения будут вноситься только в командный файл SDevice и проект SWB.

6.3.1. Модификация командного файла *Sentaurus Device*

Откройте в окне SWB проект, созданный в примере 2, и сохраните его под другим именем. Откройте командный файл SDevice для редактирования. Изменений потребует только секция Solve. Для того чтобы получить набор ВАХ зависимости тока стока от напряжения стока для различных напряжений на затворе, необходимо модифицировать секцию Solve следующим образом:

```
Solve {
  #-initial solution:
```

```

Poisson
Coupled { Poisson Electron }

Quasistationary ( MaxStep=0.02
  Goal{ Name=«gate» Voltage=@Vg@ } )
  { Coupled { Poisson Electron } }

Quasistationary ( MaxStep=0.02
  Goal{ Name=«drain» Voltage=@Vd@ } )
  { Coupled { Poisson Electron } }
}

```

Нетрудно заметить, что в секцию добавился еще один блок Quasistationary, внутри которого переменной @Vd@ задано конечное значение напряжения на стоке транзистора. При выполнении модифицированного командного файла расчет будет происходить следующим образом. Сначала напряжение на затворе увеличится до значения @Vg@ при неизменном и равном нулю напряжении на стоке. После того как значение напряжения на затворе достигнет @Vg@, начнет расти напряжение на стоке. Увеличение будет продолжаться до значения @Vd@, при этом напряжение на затворе сохраняется равным @Vg@. Таким образом, задав значение переменной @Vd@=5 В и значения для переменной @Vg@ = 1, 0, -1, -2, -3 В, мы сможем получить семейство ВАХ полевого транзистора с затвором Шоттки.

Чтобы задать значения переменных, необходимо проделать следующие действия: добавить переменную с именем Vd и значением по умолчанию 5 перед переменной Vg (флажок Before Selected Step в окне добавления переменной), открыть окно добавления значений переменной Vg и заполнить его следующим образом: Min. Value = 0, Step = -1, Number of Values = 4. После этого в проекте будет 5 узлов, которые необходимо выделить и запустить расчет.

6.3.2. Результаты моделирования

Для построения ВАХ зависимости тока стока от напряжения на стоке выделите все пять рассчитанных узлов и откройте соответствующие им файлы *.plt в программе Inspect (рис. 6.5).

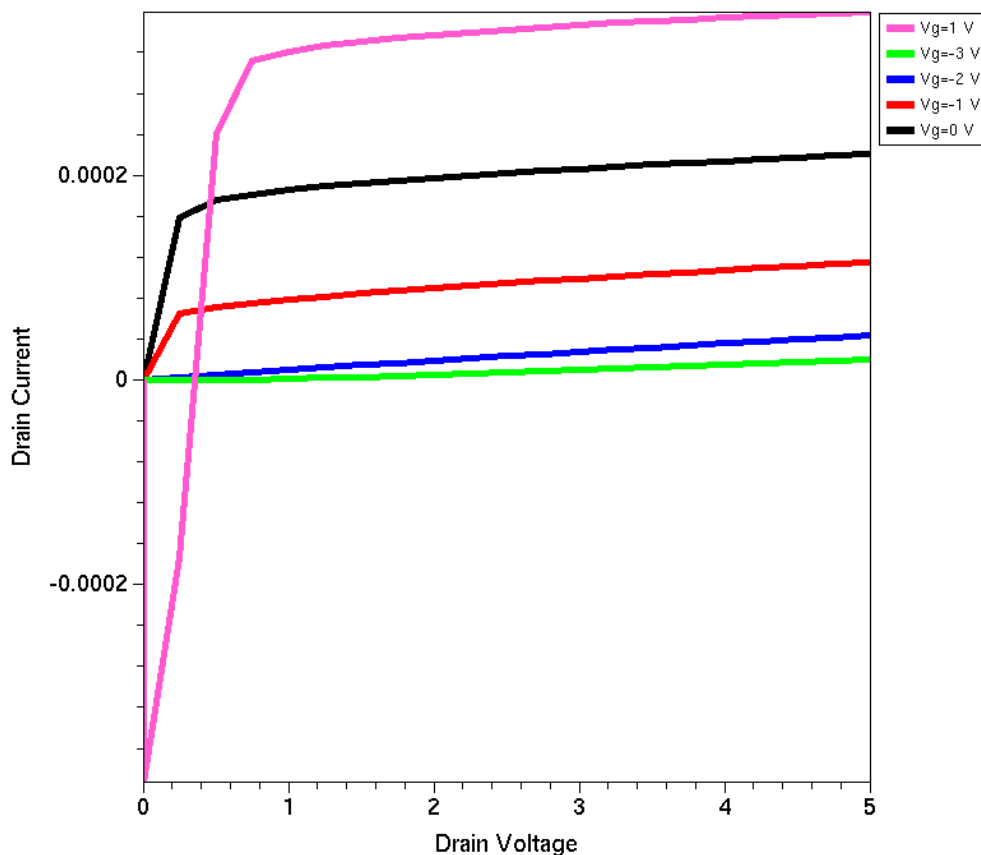


Рис. 6.5. Расчетные ВАХ транзистора

Как видно из графика, ток стока хорошо модулируется напряжением на затворе, т.е. модель транзистора работает нормально. Единственным исключением является ветвь ВАХ при напряжении на затворе, равном 1 В. Форма этой ветви объясняется тем, что при нулевом напряжении на стоке и достаточно большом смещении на затворе относительно стока через контакт Шоттки начинает течь большой прямой ток (соответственно такой же ток начинает течь через сток, только в обратном направлении, что и обуславливает его отрицательный знак). По мере того как напряжение на стоке транзистора возрастает, разность напряжений между затвором и стоком начинает уменьшаться и при определенном значении этой разности ток стока становится положительным. Данный режим работы транзистора (когда через затвор протекает большой ток) является нежелательным, поскольку приводит к быстрой деградации параметров транзистора и даже его физическому повреждению. Таким образом, из результатов расчетов можно сделать вывод, что рассматриваемый транзистор может работать при напряжениях на затворе от 0 до – 3 В.

Чтобы визуализировать некоторые физические параметры структуры и рассмотреть ряд физических процессов, откройте файлы *.dat результатов симуляции в программном модуле Tecplot. Выберите переменную ElectricField для отображения (рис. 6.6). Как видно из рисунка, наибольшее значение напряженности электрического поля получается при максимальном отрицательном смещении на затворе ($V_g = -3$ В), что вполне объяснимо, так как разность напряжений между затвором и стоком в этом случае будет максимальной (8 В). Нетрудно убедиться, что, в отличие от полупроводникового резистора, максимальная напряженность электрического поля расположена не возле стока, а возле стокового края затвора, т.е. пробой транзистора будет происходить именно в этом месте.

Далее рассмотрим переменную eCurrentDensity, которая хранит значения плотности электронного тока в каждой точке структуры (рис. 6.7). Из рисунка наглядно видно, как происходит закрытие транзистора при увеличении отрицательного напряжения на затворе. Обратите внимание на форму обедненной области. При небольших отрицательных смещениях на затворе обедненная область имеет утолщение на стоковом крае затвора. При увеличении отрицательного смещения ее форма меняется и при закрытии транзистора становится практически симметричной.

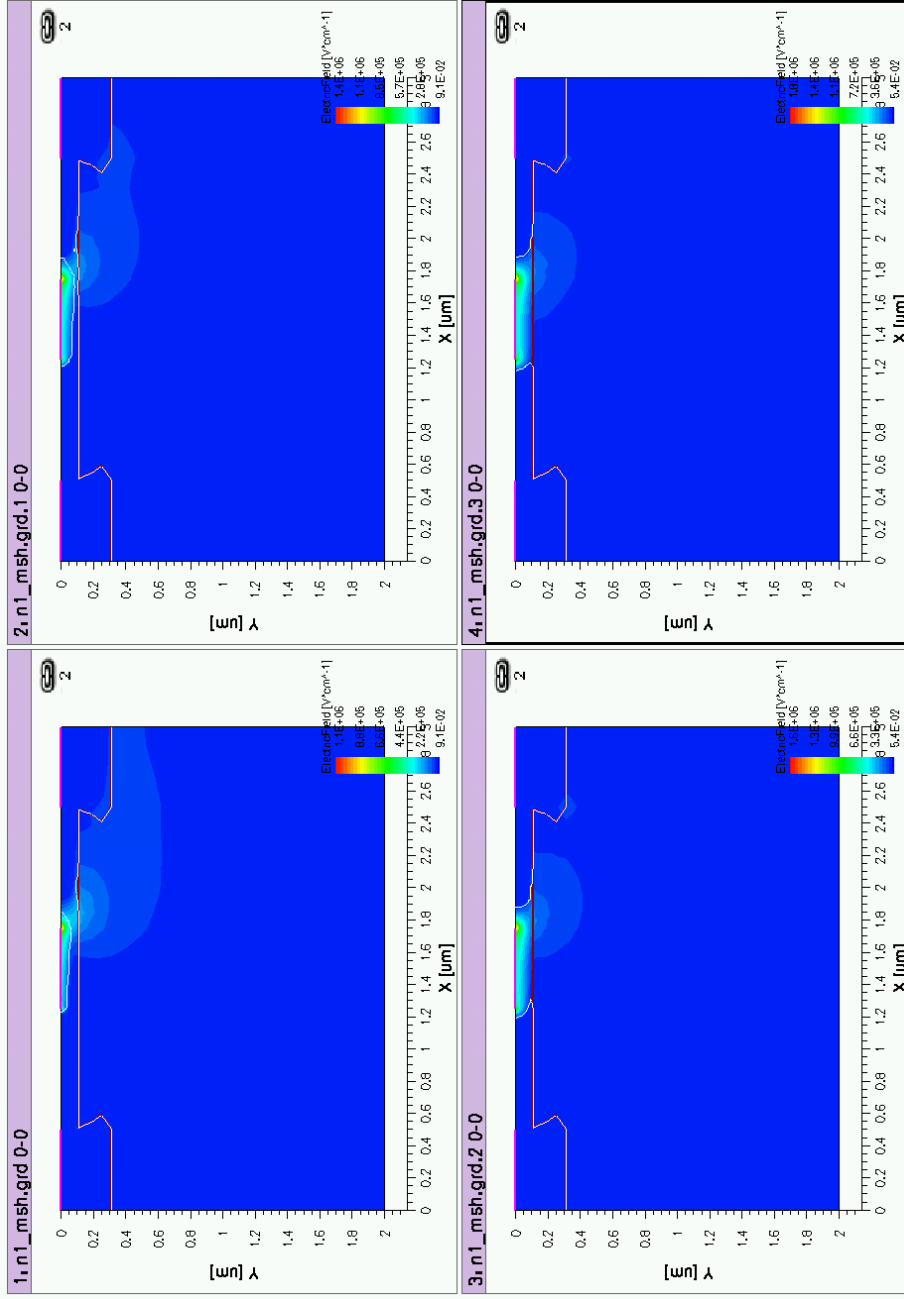


Рис. 6.6. Расчетные распределения напряженности электрического поля

6.4. Пример 4. AlGaAs/GaAs транзистор

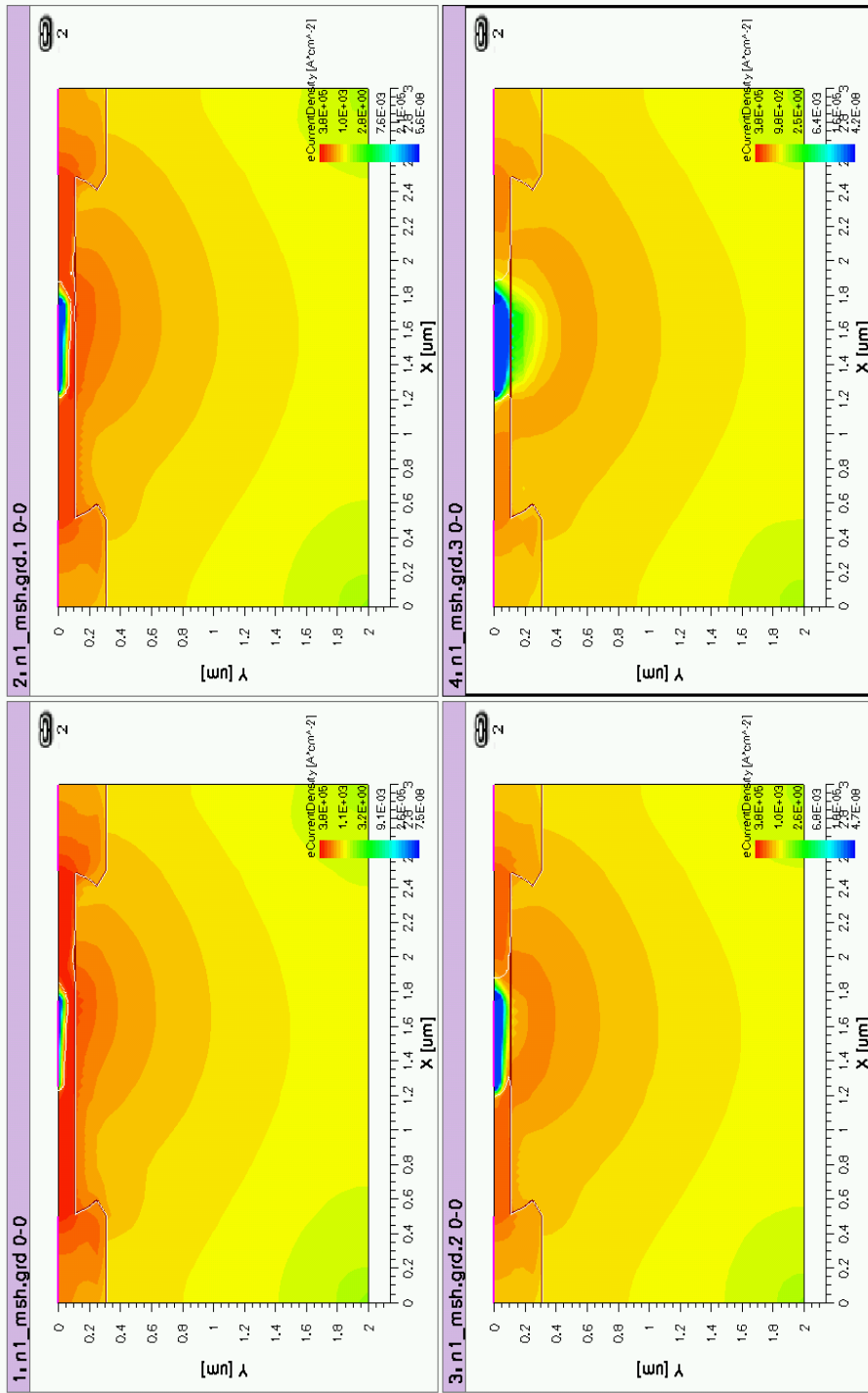


Рис. 6.7. Расчетные распределения плотности электронного тока

В примере продемонстрирован процесс создания проекта для гетероструктурного AlGaAs/GaAs транзистора с высокой подвижностью электронов (High Electron Mobility Transistor – HEMT). Далее будем называть его GaAs HEMT. Основным отличием данного вида транзистора от GaAs ПТШ является то, что ток в GaAs HEMT течет в нелегированном слое GaAs, в то время как в ПТШ ток течет в канале, легированном до уровня $3,5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Известно, что уровень легирования существенно влияет на подвижность носителей заряда в полупроводнике, а следовательно, и на рабочие характеристики транзистора. Для того чтобы обеспечить максимальную подвижность, концентрацию легирующей примеси необходимо минимизировать. Однако если не легировать канал GaAs ПТШ, то в нем не будет течь ток, так как нелегированный GaAs является полуизолятором. Для того чтобы обойти это ограничение, используется гетеропереход AlGaAs/GaAs. Контактный слой широкозонного полупроводника AlGaAs легируется до уровня 10^{18} см^{-3} , канал GaAs остается нелегированным. Так как на гетеропереходе AlGaAs/GaAs образуется квантовая яма, то часть электронов из легированного контактного слоя попадает в эту яму, которая располагается в канальном слое GaAs. Таким образом, в области канала образуется двумерный электронный газ, подвижность электронов которого гораздо больше, чем в стандартном GaAs ПТШ.

Для выполнения расчетов понадобится проект примера 3, будут получены ВАХ GaAs HEMT и построена энергетическая зонная диаграмма.

6.4.1. Модификация структуры

Откройте созданный в примере 3 проект SWB и сохраните его под другим именем. В SDE откройте для редактирования файл mesh_msh.bnd, после этого импортируйте файл mesh_msh.cmd (File > Import...). Сначала необходимо изменить материал полупроводника на AlGaAs. Для этого выделите всю структуру, из списка материалов выберите AlGaAs, а в главном меню выберите пункт Edit > Change Material. Затем необходимо добавить область канала, для этого выберите пункт меню Draw > Overlap Behavior > New Overlaps Old. При включении данной опции вновь добавляемые регионы будут перекрывать старые в случае наложения друг на друга. Добавьте прямоугольную область материала GaAs с координатами (0; 0,05) и (3; 0,075), сохраните файл *.bnd.

Далее необходимо изменить легирование структуры. Для этого выберите ConstantProfilePlacement_2 в диалоговом окне Constant Profile Placement, установите флажок Define Ref/Eval Window и введите координаты верхнего прямоугольника AlGaAs ($X1 = 0$; $X2 = 3$; $Y1 = 0$; $Y2 = 0,05$; $Z1 = 1$; $Z2 = 2$), в полях Constant Profile Definition выберите Species=ArsenicActiveConcentration, Concentration= $1e18$ и нажмите кнопку Change Placement. Сохраните файл *.cmd.

6.4.2. Модификация командного файла SDevice

Откройте командный файл SDevice для редактирования. Секции File, Electrode и Physics оставьте без изменений, после секции Physics добавьте следующие строки:

```
Physics (Material=«AlGaAs») {  
    MoleFraction(xFraction=0.26 Grading=0)  
}
```

Это секция Physics, определенная только для материала AlGaAs. В ней задана мольная доля алюминия в тройном растворе AlGaAs, исходя из которой рассчитывается ряд основных параметров полупроводника (например, ширина запрещенной зоны и диэлектрическая проницаемость).

В секцию Plot необходимо добавить переменные ValenceBandEnergy и ConductionBandEnergy. Секции Math и Solve оставьте без изменений. Сохраните командный файл и запустите расчет.

6.4.3. Результаты моделирования

Откройте файлы *.plt в программном модуле Inspect и постройте ВАХ (рис. 6.8). Если сравнить полученные характеристики с ВАХ ПТШ, нетрудно заметить, что расстояние между ветвями при 0 и -1 В на затворе НЕМТ гораздо больше. Это означает, что при одном и том же изменении напряжения на затворе изменение тока стока GaAs НЕМТ гораздо больше, чем у GaAs ПТШ, т.е. крутизна характеристики транзистора с гетеропереходом существенно больше, чем обычного транзистора с легированным каналом. В качестве упражнения для самостоятельного изучения рекомендуется произвести расчеты ВАХ данных транзисторов и получить зависимости тока стока от напряжения на затворе при фиксированном напряжении на стоке, равном, например, 5 В, затем сравнить эти кривые, а также производные этих кривых (производная кривой зависимости тока стока от напряжения на затворе есть кривая зависимости крутизны от напряжения на затворе).

Как видно из рисунка, отсечка НЕМТ наступает при напряжении на затворе -2 В.

Для того чтобы построить зонные диаграммы, необходимо произвести моделирование работы прибора при нулевых напряжениях на стоке и затворе. Для этого измените в командном файле SDevice напряжение на затворе с 5 В на 0 В и запустите расчет узла с $V_g = 0$. После этого откройте файл *.dat с результатами расчетов в программном модуле Tecplot. Сделайте срез по оси X (X cut) в районе 1,5 мкм. Для отображения кривых зависимости энергий зоны проводимости и валентной зоны выберите в левом окне имена переменных ConductionBandEnergy и ValenceBandEnergy. После этого щелкните по кнопке Create Permanent Linemaps. Постройте зависимость распределения плотности электронов (переменная eDensity) на оси Y2 в логарифмическом масштабе. Итоговый график будет выглядеть, как показано на рис. 6.9.

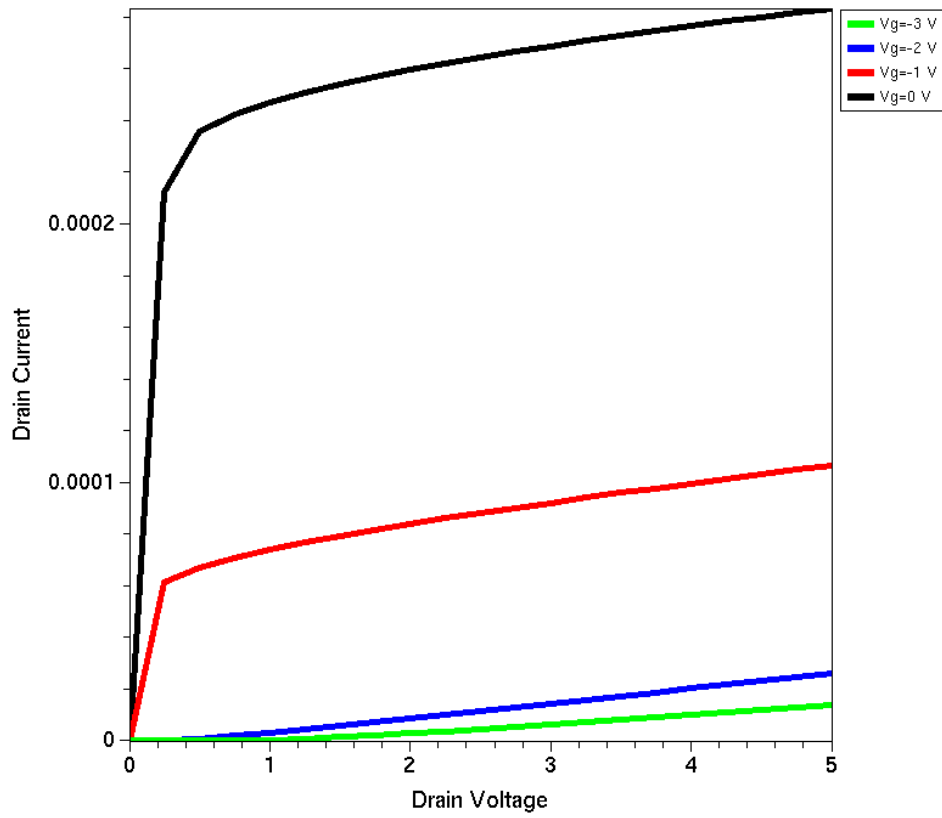


Рис. 6.8. Расчетные ВАХ GaAs HEMT

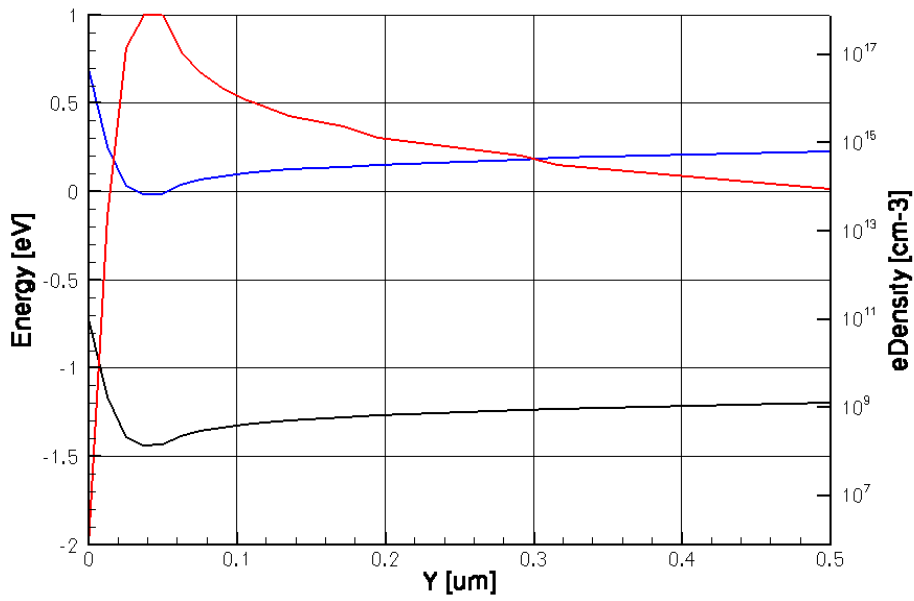


Рис. 6.9. Энергетические зонные диаграммы

Из рисунка видно, что минимальная энергия зоны проводимости в области квантовой ямы (примерно 0,05 мкм вглубь структуры, т.е. там, где начинается слой GaAs) лежит ниже уровня Ферми (0 эВ). Именно в этой области образуется двумерный электронный газ, что видно из распределения плотности электронов. Максимум плотности приходится на дно квантовой ямы в зоне проводимости.

Можно также ознакомиться с описанием расчетов НЕМТ более сложной структуры [7].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Armstrong G.A. TCAD for Si, SiGe and GaAs integrated circuits / G.A. Armstrong, S.K. Maiti. – IET, 2007. – 456 p.
2. Виртуальное производство интегральных полупроводниковых структур в системе двухуровневой подготовки кадров в области нанотехнологий / М.А. Королев [и др.] // Тр. междунар. конф. «Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта – CAD/CAM/PDM – 2008», Москва, 21–23 октября 2008. – М., 2008.
3. The International Technology Roadmap for Semiconductors Official Site [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.itrs.net>.
4. Synopsys Official Site [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.synopsys.com>.
5. Сопова О. Новое в программах для приборно-технологического моделирования от Synopsys / О. Сопова // Chip News. – 2006. – № 9. – С. 22–25.
6. Sentaurus Device User Guide. Version D-2010.03, March 2010. – Synopsys, Inc, 2010. – 1328 p.

7. Радченко Д. Моделирование СВЧ-транзистора на основе эпитаксиальной гетероструктуры (HEMT) с помощью САПР Synopsys Sentaurus TCAD / Д. Радченко, К. Сбитнев, Н. Малеев // Производство электроники: технологии, оборудование, материалы. – 2009. – № 7.

ПРИЛОЖЕНИЕ

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОТЕСТИРОВАНИЯ

1. Что такое приборно-технологическое моделирование?
2. Какие задачи решают системы TCAD?
3. Какая роль отводится TCAD в международной полупроводниковой дорожной карте?
4. Какие основные модули входят в Synopsys TCAD?
5. Какие возможности существуют в Synopsys TCAD для моделирования технологических процессов?
6. Как называется и что позволяет выполнять программный модуль для моделирования приборов?
7. Что понимают под виртуальным производством?
8. Какие задачи решает TCAD в виртуальном производстве?
9. Какие возможности предоставляет Synopsys TCAD для физического моделирования полупроводниковых светодиодов?
10. Какими способами могут создаваться командные файлы для Sentaurus Process?

11. Какими способами могут создаваться командные файлы для Sentaurus Device?
12. Какие основные команды используются в Sentaurus Process? Перечислите их ключевые параметры.
13. Из каких секций состоит командный файл Sentaurus Device?
14. Для чего предназначен программный модуль Inspect, и какие основные возможности он предоставляет пользователю?
15. Какую роль играет Sentaurus Workbench?
16. Что такое маршрут модулей в Sentaurus Workbench?
17. Каким образом посредством Sentaurus Workbench выполняются эксперименты?