Министерство образования и науки Российской Федерации НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

621.38 M744 № 3880

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАНОТРАНЗИСТОРОВ В *TCAD SENTAURUS*

Методическое руководство к лабораторному практикуму для студентов IV курса РЭФ дневного отделения

> НОВОСИБИРСК 2010

УДК 621.382.3-022.532(076.5) M744

Курс «Математическое моделирование и проектирование наносистем» читается в соответствии с учебным планом по направлению 210600 – «Нанотехнология» в 8 семестре. Методическое руководство содержит описания четырех лабораторных работ по курсу. Изложенные в руководстве материалы будут полезны студентам и аспирантам всех форм обучения.

Составители:

С.В. Калинин, А.С. Черкаев, В.Е. Зырянов, Е.А. Макаров

Рецензент канд. физ.-мат. наук, доцент Б.К. Богомолов

Работа выполнена на кафедре полупроводниковых приборов и микроэлектроники

© Новосибирский государственный технический университет, 2010

оглавление

Основные сокращения	и обозначения	4
Введение		5
Лабораторная работа 1.	МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛ ПАРАМЕТРОВ НАНОПЕРЕХ НА БАЗЕ ОСНОВНЫХ ОБОЛ И ПОДСИСТЕМ <i>TCAD SENTA</i>	ТОГИЧЕСКИХ СОДОВ ЮЧЕК A <i>URS</i> 7
Лабораторная работа 2.	ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ МОДЕ ДВУМЕРНОЙ СТРУКТУРЫ МОП-НАНОТРАНЗИСТОРОВ НА НАПРЯЖЕННОМ КРЕМЕ	ЕЛИРОВАНИЕ 3 1ИИ28
Лабораторная работа 3.	СКВОЗНОЕ МОДЕЛИРОВАН ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ХА КРЕМНИЕВЫХ ПОЛУПРОВ СТРУКТУР В <i>TCAD SENTAU</i>	ИЕ РАКТЕРИСТИК ОДНИКОВЫХ <i>RUS</i> 56
Лабораторная работа 4.	МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПА И ХАРАКТЕРИСТИК <i>НЕМТ</i> - В <i>TCAD SENTAURUS</i>	РАМЕТРОВ •СТРУКТУР 86
Заключение		
Литература		

Основные сокращения и обозначения

PC	- (англ.) персональный компьютер
TCAD	- (англ.) система приборно-технологического моделирования
САПР	- система автоматического проектирования
APM	– автоматизированное рабочее место
OC	– операционная система
ИМС	– интегральная микросхема
ITRS	– (англ.) международная технологическая дорожная карта
	для полупроводников
BAX	– вольт-амперная характеристика
ПТ	– полевой транзистор
ΜΟΠΤ	– ПТ с МОП структурой затвора или ПТ с изолированным
	затвором
МЭМС	 – микроэлектромеханическая система
HEMT	- (англ.) транзистор с высокой подвижностью электронов
	(или транзистор с гетероселективным легированием)
КЭФ	- маркировка кремния: Кремний Электронный, легирован-
	ный Фосфором
КДБ	- маркировка кремния: Кремний Дырочный, легированный
	Бором
ИП	– имплантационный пучок;
ГПа	- гигапаскаль (1 ГПа = 9,87 · 10 ³ атм)
ФСУ	– фундаментальная система уравнений
DD	– (англ.) диффузионно-дрейфовая модель
HD	– (англ.) гидродинамическая модель
ОПЗ	– область пространственного заряда
$N_{A(D)}$	– концентрация легирующей акцепторной (А) или донор-
. ,	ной (D) примесей
R_S	– поверхностное сопротивления слоя
X_i	– глубина залегания <i>p–n</i> -перехода
σ_{XX}, σ_{YY}	- компоненты тензора напряжений, направленные вдоль
	осей ХиУ
σ_{XY}	- сдвиговая (вращательная) компонента тензора напряжений

введение

Компьютерный лабораторный практикум по курсу «Математическое моделирование и проектирование наносистем» предназначен для студентов 4 курса РЭФ, обучающихся по направлению 210600 – Нанотехнология. Структурно семестровый практикум состоит из четырех лабораторных работ, каждая из которых выполняется студентами за 4 академических часа. При этом в качестве инструментального средства используется лицензионная система приборно-технологического моделирования *TCAD Sentaurus* [1, 3, 13–16], которая разработана мировым лидером в данном классе САПР – компанией SYNOPSYS (США).

Современные наносистемы в полупроводниковой электронике представляют собой, прежде всего, ИМС, содержащие в себе примерно до 1 миллиарда кремниевых транзисторов, все из которых находятся в рабочем состоянии [3, 17]. Стремительно возрастающая сложность таких схем принуждает их разработчиков на всех этапах проектирования и изготовления использовать мощные компьютеры. В настоящее время общепризнанной является та точка зрения, согласно которой успешная разработка как цифровой, так и аналоговой ИМС невозможна без точного компьютерного моделирования схемы, которое в свою очередь зависит от точного математического моделирования работы транзисторов и технологии их изготовления. Возможность нахождения реальных параметров и характеристик транзисторов задолго до изготовкремниевого чипа стала главной причиной широкого ления использования систем TCAD-моделирования в полупроводниковой индустрии. Согласно оценкам экспертов из ITRS [17], регулярно публикуемым в Internet, развитие полупроводниковых нанотехнологий в 21 веке, направленных на создание новой элементной базы электроники, возможно только на основе сочетания сложнейших средств наноизмерений (нанодиагностики) с разработкой и использованием TCADсистем новых поколений.

Суть приборно-технологического моделирования различных полупроводниковых структур микро- и наноэлектроники (в том числе нанотранзисторов, т. е. транзисторов, у которых один из характерных размеров лежит в нанометровом диапазоне) заключается в обеспечении непрерывной взаимосвязи между технологическими параметрами и электрофизическими, тепловыми, оптическими и другими характеристиками прибора. Циклический расчет технологии изготовления и физических процессов переноса электронов и дырок в приборе позволяет осуществить оптимизацию технологического маршрута и конструкции моделируемой структуры. При этом используемые модели представляют собой в основном иерархически выстроенные многомерные краевые задачи, отражающие весь накопленный к моменту разработки модели научно-технический потенциал моделирования. Решение этих задач можно получить только численными методами, для чего в TCAD Sentaurus широко используется метод конечных элементов. Здесь уместно отметить, что разработка первых *TCAD*-систем началась в конце 70-х годов прошлого века [7–10, 21–27], а к настоящему моменту уже сменилось несколько их поколений.

Из большого числа различных транзисторных наноструктур [1–6, 15–17] для лабораторных работ были выбраны две базовые, отражающие два магистральных пути развития современной электроники. Первый – это МОПТ на напряженном объемном кремнии [2–5, 17], отражающий направление кремниевой наноэлектроники, которое успешно развивается передовыми полупроводниковыми компаниями, такими как Intel. Второй – это *HEMT* на основе соединений твердых растворов $A^{3}B^{5}$, представляющий направление гетероэлектроники [4–6, 18, 19]. Каждая структура исследуется в двух лабораторных работах, в одной из которых анализируются особенности моделирования технологии изготовления (или конструирования) собственно транзистора, а в другой производятся анализ кинетических процессов переноса носителей в канале и расчет ВАХ прибора.

Данное руководство, несмотря на его вводный характер, может быть использовано при организации курсового и дипломного проектирования по направлениям 210100 – «Электроника и микроэлектроника» и 210108 – «Микросистемная техника», а также при выполнении соответствующих бакалаврских, инженерных и магистерских дипломных работ. Кроме того, авторы надеются, что оно будет интересно всем аспирантам и студентам, работающим в области современной полупроводниковой электроники.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НАНОПЕРЕХОДОВ НА БАЗЕ ОСНОВНЫХ ОБОЛОЧЕК И ПОДСИСТЕМ TCAD SENTAURUS

1.1. ЦЕЛЬ И СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Цель работы – освоение первичных методик одномерных и двумерных расчетов, анализа и графического представления результатов в *TCAD Sentaurus* на основе оболочек: *Sentaurus Workbench*, *Ligament Flow Editor*, *Inspect*, *Tecplot_SV* и приложения технологического моделирования Sentaurus Process.

Содержанием работы является исследование простейшего технологического маршрута изготовления диффузионных нанопереходов и анализ их основных параметров: глубины залегания, бокового ухода, слоевого сопротивления в зависимости от различных режимов технологического маршрута.

1.2. ПЕРВЫЕ ПОНЯТИЯ, НЕОБХОДИМЫЕ ДЛЯ РАБОТЫ В TCAD SENTAURUS

1.2.1. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ СТРУКТУРЫ TCAD SENTAURUS

Система приборно-технологического моделирования *TCAD Sentaurus* предназначена для компьютерного моделирования технологических маршрутов изготовления различных полупроводниковых многомерных структур и расчета их электрофизических параметров и характеристик. Система обеспечивает проектирование и оптимизацию элементной базы при разработке широкого спектра современных полупроводниковых наносистем различного назначения – от нанотранзисторов для микропроцессоров, схем памяти, цифроаналоговых ИМС до МЭМС-сенсоров, приборов оптоэлектронной и высокочастотной техники.

В данном лабораторном практикуме используется версия *TCAD* Sentaurus Z-2007.03, которая работает под управлением операционной системы Ubuntu (версии 10.04). *TCAD*-система установлена на сервере, организующем вычислительную работу конечных пользователей с автоматизированных рабочих мест (APM). Подготовка всех необходимых для вычислительного процесса данных осуществляется на локальный *PC*.

Структурно *TCAD*-система *Sentaurus* состоит из базовых подсистем (рис. 1.1) для расчета технологии, структур, сеток и приборов, образованных соответствующими приложениями, различных вычислительных оболочек (*framework*) и специализированных утилит. Общее число этих программных продуктов, описанное в соответствующих руководствах пользователя, – более 30, средний объем руководств составляет от 500 до 1000 страниц текста на английском языке.

SYNOPSYS°

Framework	Process Simulation	Device Creation	Device Simulation	Reference Material
Sentaurus Workbench	Sentaurus Process	Sentaurus Structure Editor	Sentaurus Device	Sentaurus Applications Library
Calibration Kit	Sentaurus Topography	DIP	Compact Models	Dios
Inspect	Advanced Calibration	Mesh Generation Tools	Sentaurus Device Electromagnetic Wave Solver	Tecplot User's Manual
Optimizer	1. 1. 1. 1.		Sentaurus Device Monte Carlo	Tecpior Pereferice Maridai
Sentaurus Data Explorer	15 00		Solvers	Release Notes Product Names and Binaries
Utilities	-		1ED	

Рис. 1.1. Общая структура TCAD Sentaurus

Вычислительные оболочки обеспечивают интеграцию этих *TCAD*-программных средств, внутренний интерфейс между ними, а также интерфейс с конечным пользователем, в результате чего создается единая вычислительная среда, в которой и протекает вычислительный эксперимент по моделированию.

Для первоначальной работы пользователь должен иметь представление о следующих приложениях и программных оболочках.

Sentaurus Workbench (*SWB*) – графическая интерактивная управляющая оболочка, обеспечивающая дружественный интерфейс с пользователем *TCAD*. *SWB* предназначена для организации информационного процесса внутри рабочих каталогов, проектов и сценариев, взаимодействия всех программных продуктов, объединенных в единый вычислительный поток, а также для параметризации входных файлов, планирования вычислительного эксперимента и статистического анализа полученных результатов в рамках проводимого исследования.

Sentaurus Process (SProcess) – основное приложение, предназначенное для одно-, двух- и трехмерного моделирования технологических процессов для структур на основе кремния или различных сложных полупроводников. Прежде всего здесь обеспечивается моделирование маршрутов с циклически повторяющимися процессами имплантации, диффузии, окисления, силицидизации, травления и нанесения. Наряду с SProcess в Sentaurus есть еще три дополнительных при-

Наряду с SProcess в Sentaurus есть еще три дополнительных приложения из подсистемы технологического моделирования: DIOS, SUPREM-IV и Taurus Process.

Ligament Flow Editor – оболочка с высокоуровневым интерфейсом, предназначенным для формирования командного файла технологического маршрута в формате соответствующего приложения. Интерфейс максимально независим от используемых программ технологического моделирования и размерности формируемой структуры.

Sentaurus Structure Editor (SSE) – приложение для графического проектирования (конструирования) двумерных и трехмерных полупроводниковых структур, исключающее применение программ технологического моделирования. Формирование структуры включает в себя генерацию геометрической модели (по слоям структуры вместе с контактами), задание аппроксимационных профилей легирования и определение процесса построения вычислительной конечно-элементной сетки.

Sentaurus Device (*SDevice*) – основное приложение, предназначенное для двумерного и трехмерного моделирования полупроводниковых приборов с учетом различных электрофизических приближений: диффузионно-дрейфового, гидродинамического, с учетом квантовых поправок, механических напряжений и т. д. Обеспечивает расчет, анализ и оптимизацию различного рода параметров и характеристик (электрофизических, тепловых, оптических и т. д.) для широкого ряда полупроводниковых структур: от кремниевых МДП-нанотразисторов и мощных биполярных транзисторов до гомо- и гетероструктур на сложных материалах типа A^3B^5 , карбиде кремния и т. д.

Наряду с SDevice в подсистему электрофизического моделирования приборов Sentaurus входят следующие приложения: SMOCA и SPARTA – для моделирования приборов методом Монте-Карло; SDevice Electromagnetic Wave – для моделирования электромагнитных

процессов электродинамики; *Medici*, *Davinci*, *TaurusDevice* – предыдущие (до объединения с ISE *TCAD* в 2005 г.) версии приложений для моделирования приборов, разработанные компанией SYNOPSYS.

Mesh Generator – приложение, обеспечивающее генерацию высококачественной конечно-элементной сетки для одномерных, двумерных и трехмерных расчетов на основе следующих оболочек: *Mesh* и *Sentaurus Mesh* – упрощенного сеточного генератора для планарных структур и улучшенного для непланарных.

Дополнительно в системе Sentaurus имеются:

– *Noffset3D* – трехмерный генератор сеток с повышенной вычислительной устойчивостью, обеспечивающий «подстроение» сетки к поверхностным слоям с целью более точного расчета различных параметров, например, токов, текущих в контактах;

– *MGoals* – библиотека алгоритмов, обеспечивающая оптимальную генерацию сеток с целью уменьшения времени расчета посредством упрощения требований к их качеству. Автоматически встроена в *SProcess*.

Inspect – графическая оболочка, предназначенная для визуализации и анализа одномерных зависимостей (прежде всего одномерных профилей легирования и ВАХ), а также для нахождения различных параметров этих зависимостей путем использования макросов, написанных на внутреннем языке.

Tecplot_SV – графическая оболочка, предназначенная для визуализации двумерных и трехмерных результатов расчетов для всех моделирующих подсистем *Sentaurus*.

Measure – утилита, предназначенная для анализа текстовых файлов (*.*log* и *.*out*) по контекстному формату.

1.2.2. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ РАБОТЕ В TCAD SENTAURUS

• Загрузка операционной системы и запуск приложений, оболочек и утилит

Рабочая операционная система (OC) *Linux*, используемая в практикуме – это *Ubuntu 10.04*. Она загружается автоматически после включения компьютера. В случае ручной загрузки системы в списке предлагаемых версий необходимо выбрать нужную строку.

При появлении запроса имени пользователя и пароля необходимо ввести следующие параметры – имя пользователя: *user*; пароль: *user*.

Затем для работы с *TCAD Sentaurus* следует активировать консоль и соединиться с сервером. Для этого запускаем *Терминал*, ярлык которого находится на рабочем столе, и с помощью клавиш « \uparrow » и « \downarrow » находим команду *connect_to_tcad2*. Далее следует ввести пароль, выданный преподавателем. При вводе пароля на экране не отображается никаких символов, в том числе привычных звездочек *****.

При работе с командной строкой необходимые приложения, оболочки и утилиты можно запускать следующими командами:

mc – *Midnight Commander* (оболочка для работы с файлами в ОС *Ubuntu*, аналог *Far Manager*, *Norton Commander*);

swb – *Sentaurus Workbench* (основная управляющая графическая оболочка, объединяющая программные средства *TCAD Sentaurus* в одну дружественную к пользователю среду);

ligedit – Ligament Flow Editor (многофункциональный редактор технологического маршрута);

sprocess – Sentaurus Process (приложение для многомерного моделирования технологического процесса);

sde – Sentaurus Structure Editor (2*D*- и 3*D*-редактор проектируемого устройства, а также 3*D*-эмулятор технологического процесса);

sdevice – *Sentaurus Device* (приложение позволяет моделировать электрические, тепловые и оптические характеристики полупроводниковых приборов);

tecplot_sv – *Tecplot SV* (универсальный графопостроитель с широкими возможностями визуализации 2D- и 3D-данных, полученных в результате моделирования или эксперимента);

inspect – *Inspect* (оболочка для отображения и анализа одномерных табличных данных, таких как профили легирования или электрические характеристики, ВАХ полупроводниковых приборов).

Перед выключением компьютера необходимо завершить работу всех приложений *Sentaurus TCAD*, запущенных ранее, и корректно закрыть все активные соединения с сервером с помощью команды *EXIT*!

• Работа с файлами

Работа с файлами в ОС *Ubuntu* осуществляется стандартным образом – посредством оконного интерфейса, аналогично ОС *Windows*. Более подробно здесь следует рассмотреть метод копирования файлов на *TCAD*-сервер и обратно, поскольку все созданные в *TCAD Sentaurus* проекты сохраняются именно на сервере. Доступ к этим проектам возможен при реализации соединения с сервером в файловом менеджере. Для этого необходимо открыть *Терминал* (ярлык на рабочем столе) и запустить *Midnight Commander* (*MC*).

Функциональные клавиши MC аналогичны клавишам Far Manager:

<i>F</i> 6 – перемещение;
<i>F</i> 7 – создание папки;
<i>F</i> 8 – удаление;
F9 – меню конфигурации MC;
<i>F</i> 10 – выход.

Соединение с сервером осуществляется следующим образом:

F9 (клав.) → правая панель (или левая панель) → Shell-соединение → вводим адрес, либо находим его в списке ранее вводимых адресов: tcadX@217.71.134.61 (где 'X' – номер рабочего места) → Enter (клав.) → вводим пароль: ***** → Enter (клав.)

Путь к рабочей директории на сервере:

home / $\hat{t}cad_home$ / $\hat{t}cad\hat{X}$ / DB / $\hat{Lab}_Students$ / ($\Gamma pynna$) / (Epurada)...

На противоположной панели *MC* необходимо открыть директорию для копирования (*Tab* – переключение между панелями), например, указать флешку:

media / disc – адрес *flash*-устройства (доступ из корневого каталога, "*disc*" – метка *flash*-устройства).

Также допускается копирование файлов на рабочий стол:

home / user / Рабочий стол – адрес рабочего стола Ubuntu.

После завершения операций с файлами следует закрыть активное соединение с сервером. При этом предлагается использовать следующую терминологию: панель *MC*, в которой осуществлено соединение с сервером, называется "*Сетевой панелью*", а противоположная панель *MC*, где соединение не реализовано, – "*Локальной*". При закрытии активного соединения можно перейти на локальную панель и набрать команду *exit*, но при этом закроется сам *MC*. Другой способ заключается в том, чтобы в сетевой панели подняться до корневого каталога сервера и затем перейти еще на одну директорию выше.

Если при работе с сетевой панелью при нажатии клавиши Enter появляется красное окно с ошибкой: "Невозможно выполнять команды на нелокальных файловых системах", – необходимо очистить командную строку.

Справочные материалы по *TCAD Sentaurus* хранятся на сервере в следующих директориях:

- home / tcad_home / tcad / tcad / Z-2007.03/ Sentaurus_Training;

– home / tcad_home / tcad / tcad / Z-2007.03 / manuals/PDFManual, где Sentaurus_Training – курс обучения Sentaurus TCAD (html-формат), а PDFManual – документация на Sentaurus TCAD (pdf-формат).

• Работа с изображениями

Работа с изображениями в *TCAD Sentaurus* сводится к визуализации результатов моделирования и их сохранению в виде законченного графика или рисунка. В качестве результатов моделирования могут выступать одномерные и двумерные распределения примеси в различных областях моделируемой структуры, а также вольт-амперные характеристики проектируемых приборов. Для сохранения какого-либо изображения прежде всего можно воспользоваться стандартной функцией захвата картинки с экрана монитора (клавиша *Print Screen*), при этом так называемый "*Screenshot*" сохраняется в *png*-формате, по умолчанию на рабочем столе.

При работе с программой *Inspect* экспорт изображений возможен только в очень неудобном *eps*-формате, поэтому сохранение графиков лучше осуществлять с помощью клавиши *Print Screen*. Кроме того, если графический файл данных имеет расширение *plx* или *plt*, то его можно построить, например в *ORIGIN-е* или в любом другом построителе графиков посредством прямого переноса данных через флешку.

При работе в программе *Tecplot_SV* для сохранения рисунков в форматах *bmp, eps, jpeg, png, tiff,* ...можно воспользоваться встроенной функцией экспорта изображений: *File* \rightarrow *Export* \rightarrow *Image*.

1.2.3. МОДЕЛИРУЕМЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ МАРШРУТ

Лабораторная работа состоит из трех частей: A, B и C. В части A необходимо в оболочке *Ligament Flow Editor* подготовить 2D командный файл и затем выполнить его в SWB, проанализировав графически в *Inspect* и *Tecplot_SV*. В части B необходимо провести 1D расчет прямой задачи для готового проекта *Lab_1b*, состоящего из двух сценариев: D_E (доза_энергия) и T_t (температура_время), а в части C – решить обратную задачу о подборе параметров технологических процессов, обеспечивающих заданную глубину *p-n*-перехода по готовому проекту *Lab 1c*.

Технологический маршрут и варианты заданий приведены в табл. 1.1 и 1.2 соответственно.

Моделируемый технологический маршрут

١ ٢.	0	Параметры операции в частях <i>А</i> , <i>В</i> , <i>С</i>			
JNO	Описание			В	G
Π/Π	операции	A	D_E	T_t	C
1	Исходная под-	КДБ-20	КДБ-20	КДБ-20	Подложка
	ложка	(100)	(100)	(100)	*
2	Осаждение маски	$D_{\rm ox} =$			
	из SiO ₂	= 0,3 мкм	—	_	—
3	Ионная имплан-	Фосфор	Фосфор	Фосфор	Примесь -*
	тация	$D = 10^{14} \text{ cm}^{-2}$	D = *	$D = 10^{14} \mathrm{cm}^{-2}$	D = ?
		<i>E</i> = 30 кэВ	E = *	<i>Е</i> =30 КэВ	E = ?
4	Отжиг	$T = 1100 \ ^{\circ}\text{C}$	$T = 500 ^{\circ}\mathrm{C}$	T = *	T = ?
		<i>t</i> = 0,5 мин	t = 1 мин	<i>t</i> = *	t = ?

Примечания: - – операция отсутствует; * – определяется вариантом задания; ? – требуется вычислить.

Таблица 1.2

Пости	Насть Пара- Номера бригад					
Tacib	метры	1	2	3	4	5
	D_1	$10^{12} \mathrm{cm}^{-2}$	$2 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$	$3 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$	$4 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$	$5 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$
	D_2	10^{13} cm^{-2}	$2 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$	$3 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$	$4 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$	$5 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$
$\mathbf{R}(D F)$	D_3	10^{14} cm^{-2}	$2 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$	$3 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$	$4 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$	$5 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$
$\mathbf{D}(D_L)$	E_1	15 кэВ	11 кэВ	13 кэВ	10 кэВ	18 кэВ
	E_2	25 кэВ	25 кэВ	33 кэВ	30 кэВ	30 кэВ
	E_3	45 кэВ	50 кэВ	48 кэВ	53 кэВ	45 кэВ
	T_1	1010 °C	1020 °C	1030 °C	1040 °C	1050 °C
	T_2	1110 °C	1120 °C	1130 °C	1140 °C	1150 °C
$\mathbf{R}(T,t)$	T_3	1210 °C	1220 °C	1230 °C	1240 °C	1250 °C
$\mathbf{D}(1_i)$	t_1	1 мин	2 мин	3 мин	4 мин	5 мин
	t_2	2 мин	3 мин	4 мин	5 мин	6 мин
	<i>t</i> ₃	3 мин	4 мин	5 мин	6 мин	7 мин
	Под-	КДБ-20	КДБ-20	КДБ-10	КЭФ-4,5	КЭФ-7,5
	ложка	(100)	(111)	(100)	(111)	(100)
C	Примесь	Phospho- rus	Phosphorus	Phosphorus	Boron	Boron
C	Глубина <i>p</i> – <i>n</i> -пе- рехода <i>X_i</i> (мкм)	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5

Варианты заданий по бригадам

1.2.4. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ В ОБОЛОЧКЕ SENTAURUS WORKBENCH

Основной информационно-структурной единицей в *Sentaurus* является **проект**, который связан с конкретным вычислительным экспериментом. Проект описывает последовательность используемых для моделирования приложений, оболочек и утилит (вычислительный поток), а также наборы варьируемых в них параметров с исходными величинами для экспериментов (план вычислительного эксперимента) (рис. 1.2).

С целью облегчения логической структуры и лучшей визуализации проект может быть разбит на более мелкие части, называемые **сценариями.** При этом каждая клетка таблицы экспериментов называется **узлом.** Каждый узел имеет в проекте свой уникальный номер, посмотреть который можно с помощью кнопки *F9*.

Работа в оболочке *SWB* может проводиться различными способами: через меню, с помощью управляющих иконок, с помощью левой и правой кнопок мыши или с помощью кнопок на клавиатуре. При этом практически все команды эквивалентны командам оболочки *Genesis*, подробно описанной в пособии [12], а принципы работы с проектами аналогичны принципам работы с каталогами в OC *Windows*.

В поле проектов имеется значительный набор готовых и просчитанных проектов, разработанных в качестве исходных образцов специалистами компании SYNOPSYS. Для того чтобы модифицировать и выполнить какой-либо из них, его следует скопировать в *рабочую директорию*. Вспомогательные проекты для лабораторного практикума находятся внизу (в конце) этого рабочего списка проектов. Каждый такой проект содержит в себе различные группы файлов, как исходные данные, так и результаты вычислений. Посмотреть эти файлы можно, например, с помощью оболочки *MC*, запускаемой в отличном от *SWB* окне терминала.

Для запуска на расчет выбранного проекта из рабочей директории достаточно нажать на иконку с изображением бегущего человека или указать в меню *project* > *run*, или воспользоваться комбинацией клавиш *ctrl*+*R*.

В каждом выполненном проекте для каждого приложения имеются колонки столбцов, окрашенные желтым цветом, означающие успешное завершение вычислений для этих узлов. При этом красный цвет узла означает наличие какой-либо ошибки или погрешности. Для того



Рис. 1.2. Общий вид окна SWB

чтобы перезапустить проект из рабочей директории на выполнение, из него следует удалить уже готовые результаты вычислений. Это можно сделать с помощью процедуры *очистки проекта* (clean up). Очистка осуществляется либо из меню project > clean up, либо по комбинации клавиш *ctrl+L*. В результате активируется окно опций очистки, общий вид которого соответствует рис. 1.3.



Рис. 1.3. Общий вид окна опций очистки проекта

Если запущенный проект по какой-либо причине нужно остановить до его полного завершения, то это можно сделать с помощью меню: project > abort running или нажав Ctrl+T на клавиатуре.

Если требуется рассчитать только часть входных экспериментальных данных проекта, то достаточно мышью выделить эти данные и далее стандартным образом, как для полного проекта, запустить их на счет.

Для просмотра результатов вычислений удобнее всего пользоваться графическими оболочками Inspect или Tecplot_SV. Активировать их можно с помощью меню Extension > Inspect и Extension > Tecplot_SV соответственно. Причем с каждым узлом, содержащим результаты расчета, связаны собственные графические и выходные текстовые файлы.

Выходные текстовые файлы автоматически создаются в процессе выполнения какого-либо приложения и имеют формат *.log или *.out. Посмотреть содержимое этих файлов прямо в момент выполнения проекта можно с помощью опции View Output, либо по клавишам Ctrl+W, либо по иконке

При обработке результатов вычислений, содержащихся в выходных текстовых файлах, удобно для быстрой визуализации данных в оболочке SWB использовать утилиту Measure или собственные процедуры, содержащиеся в командных файлах используемых приложений. Такая ситуация возникает, например, после работы приложения Sprocess, когда необходимо определить параметры слоев: толщину выращенного термического окисла или глубину залегания и поверхностное сопротивление *р*-*n*-перехода.

В том случае, когда нет проекта-прототипа, нужно создать новый проект. Для этого через меню *project > new* (или по иконке) следует определить имя проекта, который должен находиться в рабочей директории. Затем требуется задать вычислительный поток, моделирующий исходную задачу. Это можно сделать либо с помощью правой кнопки мыши, нажатой в поле No Tools (рис. 1.4), или через меню

Family Tree	Variable Values
No Tools	No Variables

Tools > *Add Tool*, или по иконке -.

Рис. 1.4. Фрагмент окна SWB, в котором задается новый вычислительный поток

В любом случае оболочка предложит выбрать необходимые для вычислительного потока приложения в соответствии с рис. 1.5.

После определения вычислительного потока необходимо сохранить проект через меню project > save as. Невыполнение операции сохранения проекта может привести к полной потере его данных.

Далее можно приступить к заполнению плана вычислительного эксперимента, который может состоять из нескольких сценариев. Примерный вид окна SWB для сценария D E (доза энергия) из проекта Lab_1b приведен на рис. 1.6. В квадратных скобках в узлах приведены их номера. При этом в окне посередине изображения показаны выходные текстовые данные, полученные в ходе выполнения приложения SProcess для узла с номером 65.



Рис. 1.5. Окно *SWB* при создании рабочего потока для нового проекта



Рис. 1.6. Окно *SWB* при выполнении сценария *Dose_Energy* для проекта *Lab_1b*

1.2.5. ОПИСАНИЕ СТРУКТУРЫ КОМАНДНОГО ФАЙЛА ДЛЯ ПРИЛОЖЕНИЯ SPROCESS ИЗ ПОЛСИСТЕМЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Командный файл части A для SProcess, подготовленный в оболочке Ligament Flow Editor приведен ниже. Он соответствует маршруту, заданному в табл. 1.1, и структурно состоит из двух разделов.

Первый, называемый головным, содержит в себе комментарий (заголовок) к командному файлу, секцию environment (выделенные строки) и секцию substrate. Комментарий образован тремя строками. Секция environment содержит в себе описания 2D области моделирования (квадрат 1 мкм × 1 мкм), начальной сетки, а также используемых имплантационных таблиц и модели диффузии. В секции substrate задаются параметры исходной пластины (КДБ ориентации (100) с $N_A = 6,8 \cdot 10^{14}$ см⁻³). Причем при написании входного командного файла нужно обратить внимание на следующие основные моменты:

- каждая новая команда должна размещаться только в одной строке;

- если команда занимает несколько строк, то при переходе на следующую строку необходимо вставить символ '\' (backslash); - символ '#' в начале строки определяет комментарий;

- для указания единиц измерения используются треугольные скобки: *location=100<nm>*.

- ось *X* направлена в глубину структуры (вниз).

##	
##	Lab_1a
##	

----- Enviroment ------

set sim left 0
set sim right 1.0
set sim bottom 1
set sim top 0
####
LIGAMENT OUTPUT##
##
user defined grid##
##
Control Models
implant tables=Default

pdbSet Silicon Dopant DiffModel Pair# ----- Control Grid. ------mgoals on min.normal.size=0.01 max.lateral.size=0.025 normal.growth.ratio=1.1 accuracy=1<nm># ----- Forming Grid. ------line x location=0 spacing=0.1 tag=Topline x location=1 spacing=0.1 tag=Bottomline y location=0 spacing=0.1 tag=Leftline y location=1 spacing=0.1 tag=Right# ----- Forming Substrate. -----region Silicon xlo=Top xhi=Bottom ylo=Left yhi=Right

init concentration=6.80e+14 field=Boron wafer.orient=100 slice. angle=[CutLine2D 0 0 0.0 1.0]

----- Forming a Diode Structure. -----## -----

----- Oxide-Mask Deposition. ----mask name=window segments= { 0 0.4 0.6 1 } negative deposit Oxide thickness=0.3 type=anisotropic mask=window

----- Save Struct. -----struct smesh=Diode_1

----- Phosphorus Implantation. ----- Phosphorus Implantation. ------
implant Phosphorus dose=1e14 energy=30 tilt=7 rot=-90

---- Annealing. ----temp_ramp name=tempramp_1_2 time=0.5 temp=1100
diffuse temp_ramp=tempramp_1_2

----- Save Struct. -----struct smesh=Diode_2

----- Save Profiles. ----SetPlxList { Boron }
WritePlx Boron.plx y=0.5

SetPlxList { Phosphorus } WritePlx Phosphorus.plx y=0.5 SetPlxList { NetActive } WritePlx NetActive.plx y=0.5

----- Rs Xj Calculation. -----SheetResistance y=0.5

----- The End. -----exit

Другой раздел, начинающийся с комментария «Forming a Diode Structure», состоит из функциональной технологической секции, описывающей последовательность выполняемых технологических операций (нанесение маски из двуокиси кремния, ионной имплантации донорной примеси и ее отжига) и из вспомогательной секции, начинающейся с ремарки «Save Profiles» и завершающейся командой exit. Команда struct обеспечивает сохранение 2D изображения моделируемой структуры с целью его дальнейшей визуализации в Tecplot SV. Команда SetPlxList описывает список выводимых примесей, которые сохраняются в соответствующих файлах с расширением *.plx в вертикальных сечениях, определяемых координатой Y (команда WritePlx). Команда SheetResistance обеспечивает вычисление поверхностного сопротивления Rs.

1.3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Включить *PC*, загрузить *Ubuntu*, создать соединение с сервером, войти в *Sentaurus*, активировав *SWB*.

2. Открыть второе окно *Терминала*, запустить *MC* и осуществить соединение с сервером в одной из панелей, определить содержание данных в рабочей студенческой директории, найти папку с учебным курсом и папку с руководствами пользователя.

3. Подключить флешку и переписать на нее какой-либо файл из руководств пользователя.

4. Вернуться в оболочку *SWB*. Перехватить текущее изображение и записать его на рабочий стол. Перейти в окно *Ubuntu* и с рабочего стола записать файл на флешку.

5. Вернуться в оболочку *SWB*. В студенческой директории создать рабочий каталог бригады и лабораторной работы.

6. Далее приступить к созданию нового проекта по расчету диффузионного наноперехода (часть A). Для этого в меню выбрать новый проект и задать вычислительный поток для вычислительного эксперимента, состоящий здесь из одного приложения *SProcess*. При этом необходимо указать в качестве источника для формирования входного командного файла приложения *SProcess* оболочку *Ligament Flow Editor* и сохранить проект под именем *Lab_1a* в своей рабочей директории.

7. Через второе окно исследовать содержимое рабочей директории, соответствующей созданному проекту *Lab_1a*. Записать все имена файлов, содержащихся в ней.

8. Вернуться в *SWB* и с помощью оболочки *Ligament Flow Editor* приступить к созданию командного файла *sprocess_lig.cmd*, задающего процесс моделирования технологического маршрута в *SProcess*. Для этого по правой кнопке на иконке *SProcess* в вычислительном потоке выбрать в появившемся меню *Edit input* > *Ligament Flow*. Затем в окне *Ligament* определить технологическую программу, для которой создается командный файл (через меню *Preferences* > *Target*), вставить заготовку головного раздела командного файла (меню *Edit* > *Add Process Header*) и, наконец, поднять в нем наверх комментарий путем перетаскивания мышью.

Потом следует определить содержание секции environment из головного раздела. Для этого необходимо установить значения переменных: title, save (установить false), simulator, region (0 0 0 1), graphics (установить false), depth (1). В окне переменной user_grid набрать все недостающие строки секции environment, начиная с комментария Control Models и до команды region включительно в соответствии с описанием командного файла, приведенного в разделе 1.2.5.

В завершение работы с головной частью определить параметры для секции *Substrate*. Теперь можно проконтролировать качество набора команд с помощью транслятора и сохранить командный файл.

Далее необходимо приступить к набору функционального раздела проекта посредством перетаскивания необходимых шаблонов команд *comment, remark, insert, implant, anneal* из правой нижней панели. Команда *insert* должна использоваться всегда, когда необходим ручной набор технологической операции. Периодически можно контролировать качество набора с помощью трансляции потока команд.

После завершения создания командного файла *sprocess_lig.cmd* можно закрыть окно оболочки *Ligament Flow Editor* правой верхней кнопкой **X**. Теперь через второе открытое окно *Терминала* следует проконтролировать содержимое своей рабочей директории и указать в отчете, какие новые файлы в ней появились.

9. Перейти снова в оболочку *SWB*, сохранить проект и запустить его на расчет (например, по кнопке 3 или клавишами *Ctrl+R*). Наблюдение за ходом расчета какого-либо узла можно вести в окне, нажав комбинацию клавиш *Ctrl+W* или кнопку 3.

10. После завершения расчета запустить двумерный визуализатор $Tecplot_SV$, (например, через меню *Extensions*). Выбрав в нем файлы с именами $Diode_1_fps.tdr$ и $Diode_2_fps.tdr$, получить двумерные изображения моделируемой стуктуры перед ионной имплантацией и в конце технологического маршрута. Посмотреть расчетную сетку в окисле и полупроводнике. Определить с помощью линейки глубину p–n-nepехода и коэффициент бокового ухода примеси под маску. Перехватить на рабочий стол все необходимые для отчета изображения. Переписать на флешку содержание рабочей директории Lab_1a . По файлу $n1_fps.out$ определить глубину залегания перехода X_j и поверхностное сопротивление Rs.

11. Вернуться в оболочку *SWB*. С помощью одномерного визуализатора *Inspect* построить график распределения легирующих примесей в сечении, соответствующем середине структуры (для y = 0.5 мкм). Затем сохранить результаты и закрыть окна *Tecplot_SV* и *Inspect*.

12. Приступить к исследованию готового проекта *Lab_1b*. Для этого перенести его из общей папки к себе в рабочую директорию. В отличие от предыдущего случая данный проект разделен на два сценария: *Dose_Energy* и *Temp_Time*.

13. Загрузить для расчета первый сценарий и установить значения параметров в соответствии со своим вариантом (для правки дважды кликнуть на нужном узле) и запустить его на расчет. После того как расчет завершится (клетки окрасятся в желтый цвет), посмотреть номера узлов (по кнопке F9) и, перейдя в окно MC, определить, какие файлы в рабочей директории соответствуют каждому узлу и описать принцип кодировки имен файлов.

14. Вернувшись в *SWB*, заполнить числовую табл. 1.3, содержащую итоговые результаты вычислений по сценарию *Dose_Energy*.

Таблица 1.3

Итоговые результаты расчета для сценария Dose_Energy

№ п/п	Доза	Энергия	Сопротивление R_s	Глубина X _j

Для нахождения R_s и X_j следует посмотреть содержимое выходных расчетных файлов, соответствующих каждому узлу (например, с помощью двойного нажатия клавиш Ctrl+W на выбранном узле). Дома построить графики зависимостей сопротивления и глубины от дозы при разных энергиях как параметра.

15. Для графического просмотра профилей легирования в *p*-*n*-переходе перейти в одномерный визуализатор *Inspect*. Выбрать графические файлы *.*plx* и получить одномерное сечение всех *p*-*n*-переходов. Затем, выбрав какую-то дозу, построить графики зависимостей для разных энергий и, наоборот, разных энергий при фиксированной дозе. Эти два изображения перехватить на рабочий стол с целью дальнейшего их использования при составлении отчета.

16. Вернуться в оболочку *SWB*. Запустить второй сценарий *Temp_Time* и провести его исследование аналогично пунктам 14 и 15. При этом вместо табл. 1.3 следует заполнить итоговую табл. 1.4 и дома

Таблица 1.4

№ п/п	Время	Температура	Сопротивление <i>R</i> _s	Глубина X _j

Итоговые результаты расчета для сценария Temp_Time

построить разгоночные кривые, т. е. зависимости R_s и X_j от времени разгонки, используя температуру как параметр.

17. Для работы дома переписать содержимое рабочего каталога *Lab_1b* к себе на флешку, а также все изображения, хранящиеся на рабочем столе APMa.

18. Приступить к выполнению завершающего проекта *Lab_1c*. Для этого следует переписать его из общей директории к себе в рабочий каталог, установить значения переменных проекта в соответствии со своим вариантом и, варьируя технологические параметры маршрута, добиться нужной глубины *p*–*n*-перехода.

19. В конце занятия переписать на флешку все необходимые для работы дома файлы из рабочей директории и рабочего стола, закрыть все активные соединения, затем окна, размонтировать флешку и, корректно завершив работу *Ubuntu*, выключить *PC*.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Опишите методику запуска оболочки SWB после загрузки ОС Ubuntu.

2. Поясните методику записи файлов из рабочей директории на флешку (с указанием пути к рабочей директории).

3. Каким образом в оболочке *MC* можно осуществить соединение с сервером и зачем это нужно делать?

4. В чем состоит разница между понятиями сетевой панели *MC* и локальной? Опишите технологию закрытия активного соединения с сервером.

5. Поясните технологию переноса картинки-изображения при работе с *TCAD Sentaurus* к себе на флешку. В каком графическом формате это можно сделать?

6. Дайте понятие проекта в *SWB* и объясните, каким образом его можно создать (скопировать), запустить на расчет, остановить вычисления и удалить результаты расчета.

7. Поясните, каким образом в *SWB* можно задать вычислительный поток из нужных приложений, и приведите примеры структуры этих потоков, использованных в лабораторной работе.

8. Объясните, что такое план вычислительного эксперимента в *SWB*. В чем суть понятия узла и какова технология работы с узлами?

9. Перечислите основные оболочки системы *Sentaurus*, а также главные ее приложения и объясните их назначение.

10. В чем суть понятия «сценарий» и каким образом его можно использовать при работе в *SWB*?

11. Сформулируйте методику (последовательность действий) создания нового рабочего проекта в оболочке *SWB*, состоящего из вычислительного потока, содержащего только одну единицу в виде приложения *SProcess*.

12. Поясните, каким образом можно проконтролировать процесс вычислений при работе приложения *Sprocess*.

13. Опишите структуру командного файла для приложения *SProcess*. Каким образом его можно создать и какое у него будет имя и расширение, если он будет создан в оболочке *Ligament Flow Editor*?

14. Поясните, каким образом в оболочке *Ligament Flow Editor* при создании головного раздела командного файла следует задавать размеры области моделирования.

15. Каким образом в оболочке *Ligament Flow Editor* задается заготовительный шаблон головного раздела командного файла? 16. Какие командные строки головного раздела командного файла соответствуют секции *environment* и для чего они предназначены?

17. Для чего предназначена секция *substrate* в командном файле для *SProcess*, каким образом она задается и какие параметры в ней определяются?

18. Приведите вид командной строки, соответствующей операции *implant*, если она задана в оболочке *Ligament Flow Editor*, и поясните смысл параметров, ее образующих.

19. Приведите вид командной строки, соответствующей операции *anneal*, если она задана в оболочке *Ligament Flow Editor*, и поясните смысл параметров, ее образующих.

20. Нарисуйте системы координат, которые используются в оболочках SProcess, Ligament Flow Editor и Tecplot SV.

21. Поясните назначение команды *struct smesh=Diode_2* и объясните, с какой оболочкой *Sentaurus* она связана и что в результате эта команда дает пользователю.

22. Какова методика проведения измерения величины бокового ухода с помощью инструмента «Линейка» в визуализаторе *Tecplot SV*?

23. Объясните, для чего предназначены команды: $SetPlxList \{ Boron \}$ и WritePlx Boron.plx y = 0.5 и с какой оболочкой Sentaurus они связаны.

24. Опишите, каким образом после успешного завершения работы *SProcess* в оболочке *Inspect* можно получить на одном полулогарифмическом графике кривые, описывающие донорную и акцепторную примесь в *p*-*n*-переходе.

25. Поясните, для чего в командном файле *sprocess_lig.cmd* размещается команда *SheetResistance* y = 0.5. Какие параметры она позволяет найти и каким образом их можно посмотреть?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВУМЕРНОЙ СТРУКТУРЫ МОП-НАНОТРАНЗИСТОРОВ НА НАПРЯЖЕННОМ КРЕМНИИ

2.1. ЦЕЛЬ И СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Цель работы – освоение методик одномерных и двумерных технологических расчетов, анализа и графического представления результатов в *TCAD Sentaurus* на основе фрагментов реальных технологических маршрутов.

Содержанием работы является подготовка командного файла для SProcess в текстовом редакторе ОС Windows с последующим его переносом в оболочку SWB, исследование зависимости параметров реального *p*-*n*-перехода от режимов технологических операций, моделирование 2D структуры и профилей легирования в ней для *n*-МОП и *p*-МОП нанотранзисторов на напряженном кремнии.

2.2. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

2.2.1. НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ОПЕРАЦИИ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ В SPROCESS

В SProcess ионная имплантация моделируется двумя способами: либо на основе аналитических приближений, использующих различные функции распределения, либо расчетным путем на основе метода Монте-Карло.

Чаще всего применяется первый способ, при котором для моделирования имплантационных профилей возможен выбор следующих видов функций распределения: gaussian – нормальное распределение Гаусса; pearson – простое распределение Пирсона-IV (по умолчанию); pearson.s – распределение Пирсона-IV с экспоненциальным хвостом; dualpearson – двойное распределение Пирсона.

Для конкретного описания этих функций необходимо задать табличный файл, в котором в определенном формате содержатся все параметры соответствующих распределений для различных видов примесей, доз, энергий и т. д. Подключение этого файла осуществляется, например, с помощью команды

implant tables=Default,

которую желательно размещать в головном разделе командного файла.

Формат самой команды имплантации, вставляемой в соответствующем месте командного файла, может иметь следующий базовый вид:

implant Boron energy=40 dose=1.5e12 tilt=7 rotation=-90,

где *Boron* – тип внедряемой примеси; при имплантации в кремний наряду с бором чаще всего используются примеси фосфора и мышьяка (*Phosphorus u Arsenic*);

energy – энергия легирования (по умолчанию в <keV>);

dose – доза имплантируемой примеси (по умолчанию в $< cm^{-2} >$);

tilt – угол наклона имплантационного пучка (ИП), взятый от нормали к поверхности пластины;

rotation – угол поворота пластины.

При этом система координат $OX_WY_WZ_W$ для имплантации примеси, связанная с пластиной, задается в соответствии с рис. 2.1.



Рис. 2.1. Определение направления ионного пучка в системе координат $OX_WY_WZ_W$

Таким образом, направление ИП определяется двумя параметрами: tilt – угол наклона ИП в плоскости ($Z_W O Y_W$) относительно оси Z_W ; rotation – угол поворота пластины относительно первоначального положения базовой системы координат против часовой стрелки.

Данные параметры имеют по умолчанию следующие значения (в градусах): *tilt=7; rotation=-90*. Частный случай с *rotation=+90* приведен на рис. 2.2.



Рис. 2.2. Определение направления вращения пластины относительно ИП

Отметим, что система координат, используемая для моделирования, отличается от рассмотренной выше системы $OX_WY_WZ_W$. В моделирующей системе координат ось X_S направлена в глубину пластины, а оси Y_S и Z_S лежат в плоскости пластины. При этом угол между осями OY_W и OY_S , обозначаемый как *slice.angle*, по умолчанию принимается равным –90.

В том случае, когда вместо модели Пирсон-IV требуется использовать модель Гаусса, то это можно сделать, применив команду:

implant species= Boron Silicon gaussian

Если при двумерном моделировании необходимо выполнить имплантацию не во всю подложку, а лишь в какую-то ее часть, то следует воспользоваться командой *mask*, а в команде *implant* указать имя созданной маски:

```
mask name=<name> segments= { 0 0.4 0.6 1 }
```

implant Boron energy=40 dose=1.5e12 tilt=7 rotation=-90 mask=<name>

Другие особенности команды *Implant* приведены в руководстве пользователя.

2.2.2. ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ОПЕРАЦИИ ТЕРМИЧЕСКОГО ОТЖИГА В SPROCESS

Операция термического отжига (или диффузии легирующих примесей) моделируется с помощью команды *Diffuse*, которая является важнейшей командой в *SProcess*. В общем случае *Diffuse* обеспечивает моделирование следующих процессов и явлений:

- термический отжиг примесей;

 – рост различных слоев в процессе отжига (например, термического окисла, силицида, эпитаксиального слоя и т. д.);

- процессы индуцированных термомеханических напряжений.

SProcess поддерживает следующие модели переноса легирующих примесей и точечных дефектов в процессе диффузии:

• ChargedPair – 3-потоковая модель многочастичной диффузии [8], в которой рассматриваются парные взаимодействия вида $A^Z + I^C \leftrightarrow AI^{(Z+C)}$ и $A^Z + V^C \leftrightarrow AV^{(Z+C)}$ между атомами легирующей примеси (A), междоузлиями (I) и вакансиями (V) с учетом их зарядовых состояний (Z – для примеси, C – для точечных дефектов) путем совместного решения системы из трех диффузионных уравнений, определяющих движение каждого типа частиц в отдельности с учетом описанных выше взаимодействий. Обычно она применяется при моделировании отработанного КМОП технологического процесса и представляет собой хороший вариант для соблюдения баланса между вычислительными затратами и точностью расчета;

• ChargedReact – наиболее сложная и физически наиболее точная 5-потоковая модель многочастичной диффузии. Здесь рассматриваются взаимодействия между пятью типами частиц: атомами примеси (A), междоузлиями (I), вакансиями (V) и всевозможными их соединениями (AV), (AI) с учетом зарядовых состояний всех частиц. Для каждой легирующей примеси рассматривается система из пяти дифференциальных уравнений с частными производными. Так как расчеты по данной модели связаны с большими затратами машинного времени, то ее рекомендуется использовать при экстремальных перепадах температуры для быстропротекающих процессов, при специфических начальных условиях и т. д.;

• *ChargedFermi* – аналог модели в приближении эффективного коэффициента диффузии [8] с учетом зарядовых состояний точечных дефектов, находящихся в тепловом равновесии. Данная модель может быть использована при длительных высокотемпературных операциях, где эффекты переходных процессов при отжиге послеимплантационных дефектов минимальны;

• *Pair* – упрощенная модель *ChargedPair* на основе уравнений взаимодействия $A+I \leftrightarrow AI$ и $A+V \leftrightarrow AV$ без учета зарядовых состояний частиц;

• *React* – упрощенная модель *ChargedReact*, не учитывающая в уравнениях взаимодействия частиц их зарядовых состояний;

• *Fermi* – упрощенная модель *ChargedFermi*, тождественная приближению с эффективным коэффициентом диффузии без учета зарядовых состояний;

• Constant – наиболее простая модель с постоянным коэффициентом диффузии. Здесь не учитывается взаимодействие между легирующей примесью и точечными дефектами, а также отсутствует эффект влияния электрического поля на движение примеси. Эта модель применяется главным образом для описания диффузии окислителя в окисле.

Выбор определенного типа модели и ее параметров реализуется с помощью команды *pdbSet*. Это можно сделать различными способами, например:

pdbSet Silicon Dopant DiffModel Pair.

Аналогично операции имплантации выбор и установление параметров модели диффузии проще всего задавать в головном разделе командного файла.

Операция термического отжига отличается большой вариативностью командного формата, отражающей реальные технологические особенности процесса диффузии. Прежде всего, это связано с составом атмосферы на планарной поверхности пластины. Так, простейший отжиг в инертной среде, при котором отсутствует рост термического окисла, можно задать командой

diffuse temperature=900 time=20

где *temperature* – температура отжига (по умолчанию в <C>); *time* – время отжига в (<hr> / <min> / <s>) (по умолчанию в <min>).

Если требуется рассчитать при определенной температуре для выбранной модели только концентрацию электрически активных примесей (т. е. без какого-либо их дополнительного перераспределения), то это можно сделать с помощью команды

diffuse temperature=900 time=0.0

Отжиг во влажной окислительной атмосфере (диффузия, совмещенная с ростом термического окисла) может быть задан как

diffuse temperature=900 time=20 H20

Простейшее линейное изменение температуры во время отжига с 800 °C до 1000 °C, происходящее в течение 20 минут в атмосфере сухого кислорода, можно определить командой

diffuse temperature=800 time=20 O2 ramprate=10<C/min>

где *ramprate* – скорость изменения температуры (по умолчанию в <C/s>).

Если параметр *ramprate* > 0, то температура будет увеличиваться (форсаж). Для уменьшения температуры необходимо устанавливать *ramprate* < 0.

В случае когда технологический режим диффузии состоит из нескольких температурных участков (например, форсаж, полка, снижение), то эти участки удобно объединить в один режим с именем *MyNN* командой *temp_ramp*:

temp_ramp name=MyNN temperature= 800 time=20 O2 trate=10<C/min> temp_ramp name=MyNN temperature=1000 time=10 O2 temp_ramp name=MyNN temperature=1000 time=40 O2 trate=-50<C/min> last diffuse temp_ramp=MyNN

При этом ключевое слово *last* указывает на то, что данный участок является конечным в режиме. Теперь скорость изменения температуры задается параметром *trate*.

Перераспределение легирующих примесей при диффузионном отжиге в окислительной атмосфере в значительной степени зависит от химического состава атмосферы. Для простейших случаев сухой и влажной атмосферы достаточно использовать команды в описанных выше форматах. При этом вместо ключевых слов O2 и H2O допускается использование их дополнительных имен dryO2 и wet, соответственно.

В более общих случаях со сложным составом атмосферы для его определения следует использовать команду gas_flow, которая является универсальным средством для смешивания различных газов. При этом количественные параметры компонентов смеси можно задавать двумя способами: либо указывая парциальные давления каждого из газов, либо определяя скорости их потоков в <*l/min*>.

Парциальные давления газов, например, для атмосферы, содержащей 30 % кислорода и 70 % паров воды при давлении в 1 атмосферу, можно определить следующим образом:

gas_flow name=Oper_2 pO2=0.3 pH2O=0.7

или

gas_flow name = Oper_2 partial_pressure = { O2=0.3 H2O=0.7 }

При таком определении газовой смеси *SProcess* не учитывает протекание возможных химических реакций между ее компонентами.

Другой способ состоит в описании окисляющей атмосферы с помощью газовых потоков:

или

gas_flow name= Oper_2 flows = { O2=0.5 H2O=0.5 H2=0.2 N2=1.0 }

В этом случае *SProcess* автоматически рассчитает парциальные давления каждого из компонентов с учетом возможного протекания между ними химических реакций типа $O_2 + 2H_2 \rightarrow 2H_2O$.

В общем случае принято, что для смешивания доступны следующие газы: *H2O* (пары воды), *O2*, *H2* (водород), *HCl*, *N2* (азот).

Команда gas_flow используется аналогично команде temp_ramp в соответствующем месте командного файла в сочетании с командой diffuse, например:

gas_flow name= Oper_2 flows = { O2=0.4 H2O=0.5 HCl=0.1 } diffuse temperature=900 time=20 gas_flow= Oper_2

или

gas_flow name= Oper_2 flows = { O2=0.4 H2O=0.5 HCl=0.1 }
temp_ramp name=MyNN temperature=1000 time=10 gas_flow= Oper_2
diffuse temp_ramp=MyNN

Толщина термического окисла является важнейшим параметром процесса термического окисления. Найти ее значение можно различными способами на основе анализа результатов расчета, содержащихся в выходном файле *.out. Простейший «ручной» алгоритм состоит в следующем. После выполнения операции термического окисления в выходном файле следует найти соответствующее место, в котором содержатся данные о распределении количества какой-либо примеси по слоям структуры, например, как на рис. 2.3. Геометрические границы слоя SiO_2 здесь составляют Bottom = 62,11 нм и Top = -80,54 нм. Тогда толщина окисла есть 62,11 + 80,54 = 142,65 нм.

Рис. 2.3. Фрагмент выходного файла *SProcess*, содержащий данные для вычисления толщины окисла

Если подобный фрагмент автоматически отсутствует в выходном файле, то его можно получить принудительно, использовав команды

select *z*=NetActive

layers

В лабораторной работе вместо ручного счета в командном файле *SProcess* используется специально написанная для этого процедура *OxiTh*, обеспечивающая вывод толщины окисла непосредственно в таблицу параметров *SWB*.

2.3. СТРУКТУРА ЗАДАНИЙ К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

Лабораторная работа состоит из двух частей: *А* и *B*. В части *A* необходимо на основе готового командного файла для моделирования 1*D* профилей легирования в сечении эмиттера биполярного транзистора, приведенного в разделе 2.4, составить командный файл для моделирования фрагмента реального технологического маршрута (табл. 2.1).

Таблица 2.1

No		A		
л <u>∞</u> п/п	Описание операции	Сценар	ий part1	Сценарий part2
1	Исходная подложка	КЭФ-1 (100)	КЭФ-1 (111)	КЭФ-4.5 (100)
2	Ионная имплантация	Бор D = 112 мкКл/см ² E = 50 кэВ	Бор D = 112 мкКул/см ² E = 50 кэВ	Бор D = 80, 800 мкКл/см ² E = 100 кэВ
3	Термический отжиг	Атмо $O_2 N_2$ 100 % 0 % 10 % 90 % 1 % 99 % 0 % 100 % $T = 1150 \ ^{\circ}C$ t = 60 мин	ссфера О ₂ N ₂ 100 % 0 % 10 % 90 % 1 % 99 % 0 % 100 % T = 1150 °С t = 60 мин	Инертный отжиг в азоте T = * °C t = 4, 9, 16, 25, 36, 49, 64, 81, 100, 121, 144, 169, 196

Моделируемый технологический маршрут с вариантами задания

Примечание. * – определяется вариантом задания: 1 – 1050; 2 – 1100; 3 – 1150; 4 – 1200; 5 – 1250.

Затем следует закодировать соответствующий заданию вариант маршрута в каком-либо текстовом редакторе ОС *Windows* (например, *Блокноте, Far Edit, Word* с сохранением в формате «Обычный текст» и т. д.). Потом его нужно перенести в соответствующий проект оболочки *SWB* и исследовать влияние варьируемых параметров технологических операций на толщину термического окисла, поверхностное сопротивление и глубину залегания получающегося *p*–*n*-перехода.

В части **B** необходимо провести 2D расчет готового проекта Lab_2b , обеспечивающего создание структуры n-МОП нанотранзистора на напряженном кремнии и исследовать ее особенности.
2.4. ИСХОДНЫЙ КОМАНДНЫЙ ФАЙЛ LAB_2ANPN.TXT ДЛЯ SPROCESS ЧАСТИ А

--- <<< N-P-N BIPOLAR TRANSISTOR (1D PROCESS SIMULATION) >>> ---# # # # Deactivating The Graphical Mode Using Tecplot SV. graphics off # ----- Selecting Models. -----# Using Pair Diffusion Model # for Dopants Diffusion in Silicon. pdbSet Silicon Dopant DiffModel Pair # ----- Meshing Strategy. ----mgoals on min.normal.size=10<nm> max.lateral.size=50<nm> normal.growth.ratio=1.2 accuracy=1<nm> # ----- Initial Grid. -----line x location=0 spacing=0.1 tag=SiTop line x location=5 spacing=0.1 tag=SiBottom # ----- Substrate. -----region Silicon xlo=SiTop xhi=SiBottom init field=Boron resistivity=10.0 wafer.orient=111 # 1) ----- Forming Sacrificial Oxide - 250 A. ------# Ambient Definition. gas_flow name=Oxi_250 flows= { H2O=0.80 N2=0.20 } # Oxidation. diffuse temperature=900 time=400<s> gas flow=Oxi 250 # 2) ----- Arsenic Implantation (N-Buried Layer). ----*implant Arsenic energy=100 dose=1.00e14*

3) ----- Inert Annealing. ----diffuse temperature=1000 time=30

----- RS Measuring. -----SheetResistance

4) ----- Sacrificial Oxide Etching. -----# Delete All Oxide Layers from Surface.

strip Oxide

5) ---- N-Epitaxy (Collector). ----# Epitaxy Simulation. deposit Silicon thickness=4 Phosphorus concentration=1e16 diffuse temperature=1100 time=60

6) ----- Forming Sacrificial Oxide - 400 A. -----# Ambient Definition. gas_flow name=Oxi_400 flows= { O2=0.90 N2=0.10 } # Oxidation. diffuse temperature=950 time=65 gas flow=Oxi 400

7) ----- Boron Implantation (Base). ----implant Boron energy=50 dose=@B_Dose@

8) ----- Inert Annealing. ----diffuse temperature=900 time=@B_Time@

----- RS Measuring. -----SheetResistance

9) ----- Sacrificial Oxide Etching. -----# Delete All Oxide Layers from Surface.

strip Oxide

10) ----- Forming Sacrificial Oxide - 500 A. -----# Dry Oxidation. diffuse temperature=1000 time=42 O2

11) ----- Phosphorus Implantation (Emitter). -----

implant Phosphorus energy=30 dose=@E_Dose@

12) ----- Inert Annealing. -----diffuse temperature=1100 time=@E_Time@

13) ----- Reoxidation. -----# Wet Oxidation.

diffuse temperature=900 time=20 H20

14) ----- Oxide Etching. -----# Delete All Oxide Layers from Surface.

strip Oxide

15) ----- Final Annealing. -----diffuse temperature=950 time=30

----- Saving Profiles. ------SetPlxList { Phosphorus } WritePlx Phosphorus SetPlxList { Boron } WritePlx Boron SetPlxList { Arsenic } WritePlx Arsenic SetPlxList { NetActive } WritePlx NetActive

----- RS Measuring. -----SheetResistance

Описание данного файла можно построить по блокам. 1. Головной раздел файла:

- область моделирования - от 0 до 5 мкм;

параметры сетки для библиотеки MGoals – минимальный шаг – 10 нм, максимальный – 50 нм, отношение размеров соседних ячеек – 1,2;

- подложка КДБ-10, ориентация <111>.

2. Формирование скрытого слоя (№ 1-4):

– термическое окисление в парах воды (80 %), толщина окисла 250 Å;

– имплантация As, доза = $1,0.10^{14}$ см⁻², энергия 100 кэB;

- отжиг в нейтральной среде при 1000 °C, 30 мин;

- определение X_i и Rs;

- удаление жертвенного окисла.

3. Создание эпитаксиального слоя (№ 5):

- осаждение слаболегированного Si толщиной 4 мкм;

– эмуляция температурной фазы эпитаксии: отжиг в нейтральной среде при 1100 °C, 60 мин.

4. Формирование базового слоя (№ 6–9):

– термическое жертвенное окисление в атмосфере из 90 % кислорода и 10 % азота, $D_{ox} = 400$ Å;

– имплантация бора, доза =@ B_Dose @ см⁻², энергия 50 кэВ, угол наклона пучка 7 градусов;

– отжиг в нейтральной среде при 900 °С в течение @B_Time@ мин; – определение X_i и R_s ;

- удаление жертвенного окисла.

5. Создание эмиттера (№ 10–12):

 термическое жертвенное окисление в атмосфере сухого кислорода, 500 Å;

– имплантация фосфора, доза = $@E_Dose@$ см⁻², энергия 30 кэВ, угол наклона пучка 7 градусов;

– отжиг в нейтральной среде при 1100 °С в течении $@E_Time@$ мин. 6. Завершающие операции маршрута (№ 13–15):

– термическое влажное окисление, $D_{ox} = 400$ Å;

- удаление жертвенного окисла;

– финальный инертный отжиг.

7. Сохранение результатов моделирования:

 – запись данных о профилях легирования фосфора, бора, мышьяка и активной примеси;

– определение X_i и Rs и запись этих данных в выходном файле.

В процессе расчета предусмотрено, что в вычислительном эксперименте варьируемыми параметрами являются дозы легирования базы и эмиттера, а также время их диффузионных разгонок. Их численные значения соответствуют плану эксперимента, приведенному на рис. 2.4, *a*, а графики профилей легирования, полученные с помощью оболочки *Inspect*, – рис. 2.4, *б*.

	Family Tree											
	SentaurusP											
		B_Dose	B_Time	E_Dose	E_Time							
1					90							
2			10	1.00e15	120							
3					150							
4					90							
5		2.00e14		1.10e15	120							
6					150							
7	1				90							
8				1.20e15	120							
9					150							

а



Рис. 2.2. Входные и выходные данные для командного файла *Lab_2Anpn.txt*:

a – план вычислительного эксперимента для SWB; δ – итоговые профили легирования мышьяка, бора и фосфора

2.5. БАЗОВЫЙ КОМАНДНЫЙ ФАЙЛ ДЛЯ SPROCESS ЧАСТИ В

#	***************************************	#
#		#
#	<<< Lab_2b >>>	#
#	_	#
#	***************************************	⊧ #

graphics off

----- Selecting Models. -----

implant tables=Default pdbSet Silicon Dopant DiffModel Pair

----- Meshing Strategy. -----

mgoals on min.normal.size=1<nm> max.lateral.size=50<nm> | normal.growth.ratio=1.2 accuracy=0.1<nm>

----- Initial Grid. -----

line x loc=0	tag=Top spacing=0.05
line x loc=2	tag=Bottom spacing=0.05
line y loc=0	tag=Mid spacing=0.025
line y loc=@ <lg< td=""><td>*0.001/Ž+0.3>@ tag=Right spacing=0.025</td></lg<>	*0.001/Ž+0.3>@ tag=Right spacing=0.025

----- Substrate. -----

region Silicon xlo=Top xhi=Bottom ylo=Mid yhi=Right init field=Phosphorus concentration=5.00e14 wafer. orient=100 slice.angle=-90

----- Saving Struct. -----

struct smesh=n@node@_0

1) ----- Screen Oxide. -----

deposit Oxide thickness=20<nm> type=anisotropic

----- Saving Struct. -----

struct smesh=n@node@_1

2) ---- P-well, Anti-punchthrough & Vt Adjustment Implants. -----

implant Boron dose=2.00e13 energy=120 tilt=0 rotation=0 implant Boron dose=1.00e13 energy=50 tilt=0 rotation=0 implant Boron dose=1.00e13 energy=25 tilt=0 rotation=0

3) ----- P-well: RTA of Channel Implants. -----

diffuse time=10<s> temp=1050

----- Saving Struct. -----

struct smesh=n@node@_3

4) ----- Clean PAD Oxide. -----

etch Oxide thickness=22<nm> type=anisotropic

----- Saving Struct. -----

struct smesh=n@node@_4

5) ----- Gate Oxidation. -----

deposit Oxide thickness=1.2<nm> type=anisotropic

----- Saving Struct. -----

struct smesh=n@node@_5

6) ----- Poly Gate Deposition. -----

deposit PolySilicon thickness=0.14 type=anisotropic

mask name=gate_mask left=-1 right=@ <lg*0.001 2="">@</lg*0.001>
etch Poly thickness=0.16 mask=gate_mask type=anisotropic etch Oxide thickness=0.1 type=anisotropic
Saving Struct
struct smesh=n@node@_6
7) Poly Reoxidation
gas_flow name=flow_1 flowN2=0.99 flowO2=0.01 diffuse time=10 temp=900 gas_flow=flow_1
Saving Struct
struct smesh=n@node@_7
8) Reflect Before Halo
transform reflect left
Saving Struct
struct smesh=n@node@_8
9) N-LDD Implantation
implant Arsenic dose=8.00e14 energy=5 tilt=0 rotation=0 ifactor=0.1
10) Halo Implantation: Quad HALO Implants
implant Boron dose=6.00e13 energy=10 tilt=30 rotation=0 mult.rot=4 ifactor=0.1
11) Structure Cut
transform cut left loc=0
Saving Struct

struct smesh=n@node@ 11 # 12) ----- RTA of LDD/HALO Implants. ----diffuse time=1<s> temp=1000 init=1e-8 # ----- Saving Struct. ----struct smesh=n@node@ 12 # 13) ----- Nitride Spacer. ----deposit Oxide thickness=0.01 type=isotropic deposit Nitride thickness=0.025 type=isotropic deposit Oxide thickness=0.01 type=isotropic Oxide thickness=0.05 type=anisotropic etch etch Oxide thickness=0.001 type=isotropic etch Nitride thickness=0.06 type=anisotropic etch Nitride thickness=0.001 type=isotropic Oxide thickness=0.008 type=anisotropic etch # ----- Saving Struct. -----struct smesh=n@node@_13 # 14) ----- N+ implantation. ----*implant spec=Phosphorus damage* implant Phosphorus dose=1.50e15 energy=20 tilt=0 rotation=0 ifactor=0.1 # 15) ----- Final RTA. ----diffuse time=1<s> temp=1025 init=1e-8 # ----- Saving Struct. ------

struct smesh=n@node@_15

16a) ----- #split <Strain> -----

etch Oxide thickness=30<nm> type=isotropic deposit Oxynitride thickness=75<nm> type=isotropic

----- Saving Struct. -----

struct smesh=n@node@_16a

16b) -----

#if @<Strain == 1>@

stress Oxynitride sxxi=@Sxx@e9<Pa> syyi=@Syy@e9<Pa> szzi=@Szz@e9<Pa>

----- Saving Struct. -----

struct smesh=n@node@_16b

#endif

16c) ----- Recompute the Stress Distribution. -----

pdbSet Silicon Dopant DiffModel Constant

diffuse time=1e-10 temp=1025

17) ----- Final Reflect. -----

transform reflect left

----- Saving Struct. -----

struct smesh=n@node@_17

----- Saving Profiles. -----

SetPlxList { Boron Arsenic Phosphorus NetActive }

WritePlx n@node@_CH y=0 WritePlx n@node@_SD y=@<Lg*0.001+0.25>@

----- *RS Measuring*. -----

SheetResistance y=0 SheetResistance y=@<Lg*0.001+0.25>@

exit

Структура плана вычислительного эксперимента, обеспечивающая вариации длины затвора, толщины *сар*-пленки [2–3] и компонентов тензора механических напряжений в *сар*-пленке, соответствует рис. 2.5.

🖏 Приложения Переход Система 🔤 🗑 🎧 💱 🛛 🗤 Usr											er 🕬		
/home/tcad_home/tcad//DB/Lab_Students/RN12-51/Lab_2b - SWB@ksref9.refs.nstu.ru v2-2007.03													
Project Edit Scheduler View Scenario Tool Pgrameter Experiments Nodes Variables Optimization Calibration Extensions Help													
□ ☞ 🖬 ¢ ⊛ × 🐒	b (2)	ะว Scenario:	all	-			• <% • 🔝	* @ @	e,	a p	2	12	
Projects Scheduler													
p _T → /home/tcad_home/tcad7/D					Eamily Tree				v	ariable V	alues		
BT RN12-51										01100010 1	01000		
JoeParsons										No Varia	hles		
					Provincement				IND Valiables				
Lab_2c			Strain	Sxx	Svv	Szz	La	CapLr					
Work Students	1							50					
- home/tcad_home/tcad/tca	2			1.00	1.00	1.00	50	250					
- /home/tcad_home/tcad/tca	3							500					
home/tcad_nome/tcadoid/	4	1						50					
B- Lab 1	5	0	0				250	250					
E Lab_1b	6							500					
Lab_1c	7						500	50					
D-D Lab_2	8							250					
the lab 4	9							500					
	10							50					
	11						50	250					
	12							500					
	13							50					
	14		1	1.00	1.00	1.00	250	250					
	15							500					
	10	-					500	50				_	
	10						500	230					
	10							300					

Рис. 2.5. Структура плана вычислительного эксперимента в оболочке *SWB*

Двумерные профили легирования активной примеси на различных стадиях создания моделируемой структуры *n*-МОП нанотранзистора имеют вид, аналогичный приведенному на рис. 2.6.

На рис. 2.7 показаны графические результаты расчетов компонентов тензора механических напряжений.

🖏 Приложения Переход Система 🔤 🥑 🖓 🕄 user											user 💿	
/home/tcad_home/tcad7/DB/Lab_Students/RN12-51/Lab_2b - SWB@ksref9.ref.nstu.ru vZ-2007.03												
Project Edit Scheduler View Scenario Tool Parameter Experiments Nodes Variables Optimization Calibration Extensions Help												
D 🖻 🖬 o 🐵 🗙 🐒 🗆	1a 🗈	Scenario:	all	-	· · · · · · · · · ·		• 🕸 • 🖬	* 3 2	କ୍ଷ୍	,	2 11	
Projects Droject Scheduler												
to Antipartical Antipartica A												
ET Lab_Students					Family Tree				varia	able values	_	
DeParsons										Verieter.		
Lab_2a									INU			
E Lab_2c			Stroin	~~	Sensouruse	C 11	La.	Contr				
tmp tmp	1		30.911		Зуу	311	Ly	50				
H work_students	2						50	250				
- /home/tcad_home/tcad/tca	3							500			_	
- /home/tcad_home/tcadold/	4						250	50			_	
/home/tcad_home/tcad3/Si	5		0	1.00	1.00	1.00		250				
	6							500				
Lab_1c	7						500	50				
the Lab_2	8	1						250				
B— ILab_3	9							500				
E- cao_4	10							50				
	11						50	250				
	12							500				
	13							50				
	14		1	1.00	1.00	1.00	250	250				
	15							500				
	16						500	50				
	17						500	200				
	10											

Рис. 2.5. Структура плана вычислительного эксперимента в оболочке SWB



Рис. 2.6. Двумерные структуры, отображающие процесс создания *n*-МОПТ на напряженном кремнии, полученные на основе командного файла для части **B**





Рис. 2.7. Изображения компонентов тензора механических напряжений σ_{XX} и σ_{YY} в *n*-МОПТ

2.3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Включить *PC*, запустить OC *Windows*, найти в директории *D:\user\TCAD* (Φ айлы ∂ ля *Lab_2*) текстовый командный файл *Lab_2Anpn.txt* и на его основе, с учетом особенностей операций ионной имплантации и диффузии, описанных в разделе 2.2, составить фрагмент технологического маршрута, определенного в разделе 2.3.

При этом надо учесть следующие особенности. Глубина области моделирования должна составлять 15 мкм. Формируемый командный файл предназначен для моделирования обоих сценариев *part1* и *part2*. Поэтому необходимо составить перечень имен варьируемых параметров (аналогичных *E_Dose, B_Dose, E_Time, B_Time из Lab_2Anpn.txt*), которые будут определять вычислительные эксперименты в оболочке *SWB* (их общее число должно быть равно 8) и показать его для проверки преподавателю. В формируемом командном файле имена варьируемых параметров должны быть заключены в скобки вида @ИМЯ@.

В том случае, когда необходим перевод единиц измерения, то математические выражения, его обеспечивающие, дополнительно надо взять в скобки @<*BЫРАЖЕНИЕ*>@, например для дозы @<*Dose*1e*-6/1.6022e-19>@, а для перевода процентного содержания атмосферы в парциальные давления – @<*O2*/100.>@.

При сохранении профилей легирования нужно использовать следующие команды, учитывающие текущий номер узла:

SetPlxList { NetActive }

WritePlx Node@node@.

Для автоматического вычисления толщины окисла следует вставить в командный файл соответствующую процедуру, которая также содержится в директории $D:\user\TCAD$ (Файлы для Lab_2). Тело процедуры необходимо разместить перед головным разделом командного файла, а обращение к ней – перед командой SheetResistance.

Подготовленный в текстовом редакторе командный файл надо предъявить для проверки преподавателю, а потом переписать на флешку с именем *Lab_2a.txt*.

Необходимо также переписать на флешку два оставшихся в директории файла, обеспечивающих работу утилиты *Measure*.

При составлении отчета дома сравнить данный командный файл *sprocess_fps.cmd* с командным файлом *sprocess_lig.cmd* из первой лабораторной работы и описать основные отличия (прежде всего в командах). 2. Затем следует перезагрузиться, запустить Ubuntu, соединиться с сервером и запустить SWB. В своей рабочей директории надо создать папку Lab_2 и в ней проект, вычислительный поток которого состоит из приложения SProcess и утилиты Measure, задать имя сценария part1, потом – сохранить созданный проект с именем Lab_2a (выбрав save as и нажав OK два раза).

3. Запустив второе окно *Терминала*, с помощью *MC* переписать три подготовленных файла (два командных и один – шаблонный) с флешки в свою рабочую директорию.

4. Вернуться в оболочку *SWB*, импортировать переписанный файл правой кнопкой, нажатой по иконке *SProcess*, выбрав затем *import file* > *commands*. Для контроля просмотреть результат вставки путем перехода в редактор командных файлов (подобно процедуре вставки). Аналогично импортировать файл для *Measure*.

5. Теперь следует задать план вычислительного эксперимента для сценария *part1*. Прежде всего следует ввести список из 8 варьируемых технологических параметров, определенных выше. Для этого в поле под иконкой *SProcess* по правой кнопке последовательно ввести имена параметров. Затем через меню *Experiments > Add new experiment* заполнить числовые данные вашего вычислительного эксперимента, соответствующего сценарию *part1*, и **сохранить проект**.

6. Провести расчет, соответствующий сценарию *part1*. Выписать данные по Rs и X_j , соответствующие каждому узлу, а также данные, определяющие толщину выращенного окисла двумя способами (ручным вычислением по выходному файлу и автоматическим вычислением) в зависимости от процентного содержания кислорода и ориентации подложки. В *Inspect* построить график зависимости профилей легирования активной примеси от процента содержания кислорода в атмосфере и привести его в отчете. Дома представить табличные данные в графическом виде и привести их в отчете с соответствующими таблицами и выводами.

В отчете следует также привести следующие данные: подробно откомментированный на русском языке составленный выше командный файл *sprocess_fps.cmd*; подсчитать, сколько всего новых файлов возникнет в рабочей директории после выполнения сценария *part1*; определить, сколько файлов соответствуют одному расчетному узлу и привести список расширений этих файлов с указанием их назначений.

7. Другую часть сценария *part2* задать через меню *Scenario* и затем аналогично пункту 5 заполнить данные по вычислительному эксперименту, соответствующие вашему варианту задания из раздела 2.3.

8. Провести расчет, соответствующий сценарию *part2*. Выписать данные по Rs и X_j , соответствующие каждому узлу в зависимости от корня квадратного от времени, и дома построить графики этих зависимостей при различных дозах (графики разгоночных кривых), в отчете сделать соответствующие выводы.

9. Приступить к выполнению части **В**. Для этого перенести в свою рабочую директорию из общей папки соответствующий проект и переписать к себе на флешку командный файл. Дома проанализировать структуру командного файла и описать маршрут изготовления двумерной полупроводниковой структуры *n*-МОП нанотранзистора аналогично описанию, приведенному в разделе 2.5. При этом перечислить новые команды и описать их назначение.

10. Изменить данные по вычислительному эксперименту, соответствующие вашему варианту, приведенному в табл. 2.2. При этом необходимо выполнить два варианта расчетов (без создания сценариев). Первый — выбрав минимальную толщину *cap*-пленки, рассчитать двумерные распределения мышьяка, бора и фосфора и активной легирующей примеси аналогично рис. 2.6 для трех вариаций длины затвора с учетом наличия механических напряжений в *cap*-пленке и без них. Затем для какой-нибудь определенной длины затвора и типа механических напряжений в *Tecplot_SV* получить двумерные графики распределения легирующих примесей на различных стадиях технологического маршрута, перехватить четыре получающиеся картинки и включить их в отчет.

Таблица 2.2

№ п/п	Длина затвора <i>Lg</i> , нм	Толщина пленки d _{cap} , нм	Компоненты тензора напряжений Sxx, Syy, Szz, ГПа
1	50, 250, 500	55, 85, 150	2, 1, 1
2	60, 260, 600	50, 75, 100	1, 2, 1
3	70, 240, 550	60, 80, 110	1, 1, 1
4	80, 200, 500	65, 85, 155	1, 2, 0
5	90, 180, 480	40, 60, 75	1, 1, 2

Варианты задания для части В

11. Затем построить двумерные профили распределения компонентов тензора механических напряжений (*StressXX*, *StressYY*, *StressXY*) в зависимости от длины затвора (согласно номеру бригады) для двух случаев – с учетом и без учета напряжений в *сар*-слое. Перехватить шесть картинок и привести их в отчете.

12. Используя проект *n*-МОПТ части **B** в качестве основы, модифицировать его с целью получения двумерной структуры *p*-МОПТ на напряженном кремнии. При этом знак механических напряжений в *cap*слое следует изменить на противоположный и изменить дозы легирования и времена разгонок исток-стоков таким образом, чтобы избежать эффекта их диффузионного смыкания в канале транзистора. В отчете описать выполненную модификацию командного файла.

13. Для минимальных значений длины канала и *cap*-пленки рассчитать распределение компонентов тензора механических напряжений структуры при двух ее состояниях: при наличии и отсутствии механических напряжений в *cap*-слое. Перехватить полученные при этом картинки и вставить их в отчет.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Быстрый термический отжиг происходит при температуре 900 °С в течение 5 с в атмосфере сухого кислорода. Опишите эту операцию в формате команд *SProcess*.

2. Запишите команду ионной имплантации бора с параметрами: $D = 800 \text{ мкКул/см}^2$, E = 100 кэВ и с учетом эффекта каналирования.

3. Запишите команду ионной имплантации фосфора с параметрами: $D = 800 \text{ мкКул/см}^2$, E = 100 кэВ без учета эффекта каналирования.

4. Перечислите основные классы моделей имплантационных профилей и поясните назначение команды *implant tables=Default*.

5. Перечислите основные классы моделей диффузии в SProcess и поясните назначение команды pdbSet Silicon Dopant DiffModel Pair.

6. Приведите один из основных типов формата команды *implant* и поясните физический смысл ее параметров с указанием их единиц измерения по умолчанию.

7. Поясните, каким образом в командном файле для расчета *p*-*n*-*n*-*n*ерехода сохраняются данные о графических результатах моделирования технологических операций. Каким образом можно посмотреть эти данные в оболочке *Tecplot_SV*?

8. Технологическая операция инертного термического отжига состоит из трех рабочих интервалов: подъема температуры (форсаж) с 800 °C до 1000 °C за 10 мин, полки на 1000 °C в течение 30 мин и снижения с 1000 °C до 800 °C за 40 мин. Закодируйте эту операцию с помощью команды diffuse для SProcess.

9. Перечислите, какие химические газы можно перемешивать при создании окислительной атмосферы в *Sprocess*, и приведите пример команды, это реализующей.

10. Какая модель процесса ионной имплантации используется по умолчанию в команде *implant* и каким образом ее можно заменить на модель гауссианы?

11. В каких единицах измерения задаются величины компонентов смеси атмосферы, используемой при термическом окислении? Приведите пример команды, задающей атмосферу следующего состава: кислород – 10 %; азот – 89,9 %, HCl – 0,1 %.

12. Опишите методику создания проекта, содержащего приложение *SProcess*, командный файл которого создан не в оболочке *Ligament Flow Editor*, а в текстовом редакторе.

13. Опишите методику импорта текстового командного файла для приложения *SProcess* в оболочке *SWB*.

14. Каким образом в оболочке *SWB* задаются имена параметров технологических режимов, содержащиеся в командном файле *sprocess_fps.cmd*?

15. Поясните, каким образом в оболочке *SWB* задаются значения параметров, определяющих вычислительный эксперимент для *Sprocess*.

16. Как можно получить данные по результатам моделирования параметров *p-n-n*ерехода, соответствующие какому-либо конкретному узлу плана вычислительного эксперимента?

17. Опишите методику вычисления толщины термически выращенного окисла, получающегося в конце маршрута моделирования по выходным данным приложения *SProcess*.

18. Объясните понятие «процедура в командном файле» и опишите технологию применения процедуры в лабораторной работе.

19. Поясните, каким образом задаются сжимающие напряжения в *сар*-пленке *p*-МОПТ и как надо модифицировать командный файл для расчета *n*-МОПТ в файл для расчета в *p*-МОПТ.

20. Какова предельная величина допустимых деформаций и механических напряжений в кремнии и каким образом ГПа можно перевести в единицы атмосфер?

21. Как в командном файле для расчета *n*-МОПТ сохраняются данные о графических результатах моделирования технологических операций и каким образом можно визуализировать эти данные в оболочке *Tecplot_SV*? 22. Укажите компоненту тензора механических напряжений, действующую вдоль канала *n*-МОПТ, и поясните, будут ли возникать эти напряжения в том случае, когда *cap*-пленка осаждается без наличия в ней механических напряжений.

23. Каким образом можно получить и улучшить двумерное изображение при прорисовке компонент тензора механических напряжений в оболочке *Tecplot_SV*?

24. Поясните, в каких частях структуры *n*-МОПТ возникают механические напряжения, действующие вдоль канала. Чем картина этих напряжений для структуры *n*-МОП нанотранзистора с ненапряженной *сар*-пленкой отличается от картины с напряженной *сар*-пленкой?

25. Объясните, из каких результатов расчетов, полученных в лабораторной работе, следует, что быстродействие *n*-МОП нанотранзистора на напряженном кремнии увеличивается по сравнению со случаем ненапряженного кремния.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3

СКВОЗНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КРЕМНИЕВЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР В TCAD SENTAURUS

3.1. ЦЕЛЬ И СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Цель работы – освоение методик сквозного моделирования ВАХ и электрофизических параметров кремниевых полупроводниковых структур на основе последовательного использования вычислительных потоков, содержащих приложения *SProcess* и *SDevice* с последующим анализом данных в графических оболочках.

Содержанием работы является изучение различных методик по подготовке данных о контактах в структуре, профилях легирования, полученных в *SProcess* и передаваемых в *SDevice* на основе приложения *SSE*, а также командных файлов для *SDevice*. В ходе выполнения работы в оболочке *SWB* проводятся двумерные расчеты ВАХ различных структур *p*-*n*-переходов, определяется величина напряжения пробоя в них, а также исследуется влияние механических напряжений на ВАХ *n*-МОПТ на напряженном кремнии.

3.2. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

3.2.1. ОСНОВНЫЕ СПОСОБЫ ПОДГОТОВКИ ДАННЫХ ДЛЯ SDEVICE О ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ СТРУКТУРЕ, ПОЛУЧЕННОЙ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ В SPROCESS

Для проведения расчетов электрофизических характеристик (ВАХ, ВФХ и т. д.), а также различных электрофизических параметров (напряжения пробоя *p*–*n*-перехода, коэффициентов усиления для БТ, пороговых напряжений для МОПТ и др.) в полупроводниковой структуре, рассчитанной в технологическом приложении *SProcess*, необходимо определить контакты, на которых задаются управляющие напряжения и через которые протекают токи электродов. Кроме того, технологическая область моделирования зачастую не совпадает с электрофизической областью моделирования, например, в *SProcess* область моделирования может составлять половинку МОПТ от истока до центра канала, в то время как в *SDevice* для расчета нужна полная структура, содержащая как область истока, так и область стока.

Задавать информацию о контактах структуры в Sentaurus можно различными способами: с помощью специальных команд, имеющихся в SProcess, либо передачей данных из SProcess в SSE с последующим определением областей контактов.

В SProcess, например, для определения двух контактов в p-nпереходе (анода к p-области и катода – к n-области), аналогичном структуре из лабораторной работы 1, можно использовать следующие команды:

----- Осаждение алюминия -----

mask name=Metal segments= { 0 0.7 1.3 2 } deposit Aluminum thickness=0.3 mask=Metal isotropic

----- Определение контактов -----

contact bottom name=Anode contact box xlo=-0.7 xhi=0.1 ylo=0.3 yhi=1.7 name=Cathode Aluminum

Преобразование области моделирования на примере МОПТ в соответствии с рис. 3.1 можно реализовать с помощью команды *transform* reflect left.

Способ подготовки файлов данных с помощью приложения *SSE* рассмотрен в разделах 3.2.2–3.2.3.

В версии Sentaurus Z-2007.03 для окончательной подготовки входного файла для SDevice (*_msh.tdr), содержащего информацию о геометрии моделируемой структуры, профили легирования в ней и расчетную сетку, следует использовать приложение SSE. Пример командного файла, обеспечивающего такую подготовку для 2D структуры, состоящей из *p*-*n*-перехода с уже заданными в нем контактами, дается ниже.







Рис. 3.1. Технологическая (а) и электрофизическая (б) области моделирования

; Clearing the Database

(sde:clear)

; Defining Parameters

(define BND ''Diode_1-@previous@_bnd.tdr'') (define DOP ''Diode_1-@previous@_fps.tdr'')

; Reading the Boundary

(sdeio:read-tdr-bnd BND)

; Reading the Doping

(sdedr:define-refinement-window ''DopWin'' ''Rectangle'' (position 0.0 0.0 0.0) (position 2.0 2.0 0.0)) (sdedr:define-submesh-placement ''Process'' ''Doping'' ''DopWin'' 0 ''NoReplace'' 0 0 0 '''' ''Z'' 0) (sdedr:define-submesh ''Doping'' DOP)

; Defining Global Grid

(sdedr:define-refinement-size ''GloGr'' 0.1 0.1 0.1 0.1) (sdedr:define-refinement-placement ''Placement_GloGr'' ''GloGr'' ''DopWin'')

; Refinement Boxes

(sdedr:define-refinement-window ''RefBox'' ''Rectangle'' (position 0.5 0.0 0.0) (position 1.5 0.5 0.0)) (sdedr:define-refinement-size ''RefBoxGr'' 0.01 0.01 0.01 0.01) (sdedr:define-refinement-placement ''Placement_RefBox'' ''RefBoxGr'' ''RefBox'')

; Saving the MESH Command File

(sdeio:save-tdr-bnd (get-body-list) "n@node@_bnd.tdr") (sdedr:write-cmd-file "n@node@_msh.cmd") ; Build Mesh

(system:command ''snmesh n@node@_msh'')

3.2.2. ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ В ПРИЛОЖЕНИИ SENTAURUS STRUCTURE EDITOR

SSE является инструментом для создания/редактирования 2D/3D структур полупроводниковых приборов в рамках TCAD Sentaurus. При трехмерном моделировании он позволяет также проводить эмуляцию некоторых стандартных технологических операций микроэлектроники. Процесс создания/редактирования прибора может выполняться двумя способами: в интерактивном режиме с помощью встроенного GUI (Graphical User Interface) и редактированием командного файла посредством текстового редактора.

Любой создаваемый в SSE прибор может быть представлен совокупностью трех основных блоков: конструктивной геометрии прибора (прямоугольники, полигоны и т.д.); блока, задающего постоянные и аналитические профили легирования и блока, определяющего стратегию построения конечно-элементной сетки. Таким образом, SSE, помимо всего прочего, является интерфейсом для конфигурирования и вызова приложений, обеспечивающих процесс построения сетки (например, Sentaurus Mesh, Noffset3D), для чего им создаются файлы *.bnd (boundary – граница) и *.cmd (command – команда). Необходимо отметить, что это справедливо лишь при работе с GUI. После успешного завершения работы SSE генерирует файл: *_msh.tdr, который является входным для приложения SDevice, моделирующего электрофизику прибора.

Альтернативой работы с *GUI* является написание командного файла с использованием сценариев, основанных на внутреннем языке *Scheme*. Данный способ является очень полезным при создании параметризованных структур приборов (например, по геометрии). Основные команды, используемые при создании геометрии прибора, задании профилей легирования и построении сетки, будут рассмотрены ниже на конкретном примере.

По умолчанию геометрические размеры в SSE измеряются в микрометрах, но при желании может быть введен масштабный коэффициент, позволяющий использовать другие единицы измерения. При 2D моделировании принимается следующая система координат: ось X направлена вправо, а ось Y – вниз (прямо противоположно системе координат, принятой в *SProcess*). Также по умолчанию *SSE* настроен на работу со входным командным файлом под именем *sde_dvs.cmd*, который должен находиться в папке проекта.

За более подробной информацией о технологии работы в SSE надо обратиться к соответствующим разделам руководства пользователя (User Guide) или учебного курса – Sentaurus Traning.

3.2.3. ОСНОВНЫЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ СОЗДАНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ СТРУКТУРЫ *p–n*-ПЕРЕХОДА В ИНТЕРАКТИВНОМ РЕЖИМЕ SSE

Исходная задача: создать в приложении *SSE* в интерактивном режиме без использования технологического моделирования *SProcess* структуру *p*–*n*-перехода, аналогичную описанной в разделе 3.2.1.

Вначале необходимо запустить *SSE* в новом окне *Терминала* в автономном режиме по команде *SDE*, набранной в командной строке. Затем в раскрывшемся окне (рис. 3.16) следует изменить состояние интерактивного режима, принятого по умолчанию. Для этого нужно:

1) переключиться в режим точного ввода координат (exact coordinates mode): Draw > Exact coordinates;

2) отключить опцию автоматического именования создаваемых областей прибора: *Draw > Auto Region Naming* (галочка должна отсутствовать).

Создание конструктивной геометрии прибора, состоящей из подложки, маскирующего слоя двуокиси кремния и двух контактов, следует начинать с задания подложки. Профили легирования в *p*-*nnе*реходе и расчетная сетка определяются после описания геометрии.

• Создание подложки

а) Выбрать материал: на панели инструментов в списке материалов (*Material List*) находим кремний – *Silicon* (обычно стоит по умолчанию)



б) Создать регион подложки, для чего в качестве геометрической фигуры выбрать прямоугольник. Это можно сделать, либо посредством соответствующей кнопки на панели инструментов, либо через меню *Draw* > 2D Create Tools > Rectangular Region. При этом для появления диалогового окна, в котором необходимо ввести координаты

двух противоположных углов прямоугольника (*Exact Coordinates*), необходимо два нажатия (клика) мыши. В появившемся окне вводим следующие координаты: (0; 0), (2; 2). Далее появится диалоговое окно, в котором необходимо ввести идентификационное имя созданного региона/области. В нашем случае это "*R.Substrate*".

• Создание слоя оксида

Аналогичным образом создаем слой оксида на поверхности подложки. Параметрами этого слоя являются: материал == SiO_2 , координаты углов прямоугольника (0 ; 2), (2 ; 2,2), имя региона "*R. Oxide*". Так как на экране окисел будет находиться внизу, изображение следует перевернуть.

• Создание области окна под алюминиевый контакт катода

Катодный контакт должен располагаться в окне масочного слоя. Поэтому, прежде чем создавать собственно контакт, нужно сформировать область, имитирующую окно в маске. Так как в этом случае слой алюминия имеет Т-образную форму, то в качестве геометрической фигуры нужно выбрать полигон (многоугольник). Доступ к нему аналогичен выбору прямоугольника с тем лишь отличием, что в меню выбирается Polygonal Region или на панели кнопка . Прежде чем создавать собственно фигуру, необходимо установить параметр замещения регионов (Default Boolean Expression). Это можно сделать через Draw > Overlap Behavior > New Replaces Old или посредством кнопки При создании полигона после каждого нажатия левой кнопки мыши появляется диалоговое окно, в котором необходимо ввести координату следующей точки. Последовательность точек должна быть следующая: (0,8; 2), (1,2; 2), (1,2; 2,2), (1,6; 2,2), (1,6; 2,3), (0,4; 2,3), (0,4; 2,2), (0,8; 2,2), (0,8; 2,1). При этом в качестве материала нужно выбрать алюминий. Для того чтобы завершить создание полигона, ввод последней точки необходимо инициировать нажатием средней кнопки мыши. Имя региона можно определить как "R. Contact".

• Создание собственно контактов

Для определения контакта необходимо вызвать соответствующее диалоговое окно посредством меню *Contacts* > *Contact Sets*. В нем необходимо заполнить поле имени контакта (*Contact Name*), выбрать цвет контакта (*Edge Color*) и его толщину (*Edge Thickness*). Чтобы добавить определенный контакт в список контактов, необходимо нажать кнопку *Set*. В конструируемой структуре следует описать два контакта со следующими параметрами: 1) имя – *Anode*, цвет (в формате *RGB*) – 100, толщина контакта – 6; 2) имя – *Cathode*, цвет – 010, толщина – 6.

После определения контактов их необходимо активировать. В конкретный момент времени активированным может быть только один контакт. Активация производится посредством вызова диалогового окна *Contact Sets* через меню *Contacts*. Далее в списке контактов выбирается необходимый контакт и нажимается кнопка *Activate*. Альтернативой данному способу активации служит выбор контакта из списка на панели инструментов. Так выглядит этот список по умолчанию посе

Также следует знать, что существует несколько способов добавления контакта к структуре, но в данной лабораторной работе будут рассмотрены только два.

1. Активируем контакт Anode. Далее необходимо выбрать уровень выделения (Selection Level). Он необходим для того, чтобы менять формат выбора областей прибора. Для анода необходимо выбрать Select Edge, что означает выбор лишь отдельных сторон геометрического объекта (например, стороны прямоугольника подложки). Список Selection Level находится на панели инструментов и по умолчанию выглядит следующим образом: Select Body . Далее поместим курсор как можно ближе к нижней границе подложки (месту расположения анода) и нажмем правую кнопку мыши, после чего соответствующая сторона подложки (на самом деле отрезок между двумя точками) выделится цветом. Для того чтобы контакт к подложке появился на изображении, остается подтвердить свое желание использовать в качестве анода именно выделенный отрезок. Это можно сделать с помощью Contacts > Set Edge(s).

2. Добавление электрода *Cathode* абсолютно аналогично предыдущему, но здесь *Selection Level* имеет значение *Select Body* и выбирать нужно не отрезок, а целую область/регион (в нашем случае *R.Contact*). А для подтверждения добавления контакта используется последовательность *Contacts* > *Set Region Boundary Edges*.

После завершения создания контактов нужно удалить область *R.Contact* следующим образом: *Edit* > 2D Edit Tools > Delete Region.

• Определение профилей легирования

Постоянный профиль легирования имеет подложка (КДБ-20). В качестве легирующей примеси используется бор с концентрацией 6,8 · 10¹⁴ см⁻³. Механизм, позволяющий добавлять профили легирования (как постоянные, так и аналитические) и области перестроения сетки, состоит из следующих основных частей:

– области преобразования (Refinement/Evaluation Window);

- стратегии преобразования (параметры профиля, параметры сетки);

- конструкции, объединяющей оба предыдущих понятия (*Placement*).

В качестве области преобразования может быть не только прямоугольник, но и полигон, кубоид и даже линия (для аналитического профиля легирования). Необходимость конструкции *Placement* заключается в дополнительном наборе опций, который будет раскрыт по мере необходимости (за более подробной информацией следует обратиться к руководству пользователя или тренингу).

Для добавления постоянного профиля легирования нужно выполнить последовательно *Device* > *Constant Profile Placement* или же на панели инструментов нажать кнопку \blacksquare . В поле имени размещения (*Placement Name*) нужно указать *Pl.Constant*, а в поле области типа размещения (*Placement Type*) – *Region* == *R.Substrate*. В поле параметров профиля легирования (*Constant Profile Definition*) необходимо указать имя профиля (*Name*) *Pr.Boron*, тип примеси (*Species*) *BoronActive-Concentration*, концентрацию примеси (*Concentration*) 6.8E14. Затем следует нажать кнопку *Add Placement*.

Для аналитического профиля легирования доступ к его созданию осуществляется через Device > Analytical Profile Placement или с помощью соответствующей кнопки на панели инструментов . Но прежде чем задавать параметры профиля или области размещения, необходимо создать область преобразования (Refinement/Evaluation Window). Как отмечалось выше, это будет линия (Base Line). Назначением этой линии определяется начало распространения функции, задающей аналитический профиль (Гауссиана или функция ошибок). Направление распространения профиля относительно этой базовой линии возможно одновременно в обе стороны. Также варьируя длину данной линии, можно корректировать размеры и форму 2D профиля при постоянных прочих его характеристиках. Создание базовой линии осуществляется через меню Mesh > Define Ref/Eval Window > Line. В появившихся диалоговых окнах нужно указать следующие параметры: координаты точек – (0,7 ; 2,0), (1,3 ; 2,0); имя этого "окна" – RW.BaseLine. Далее можно задавать параметры аналитического профиля. В поле Placement Name задаем Pl.Analytical, в поле Ref/Win должна появиться созданная нами заранее RW.BaseLine. Теперь перейдем к определению параметров профиля (Profile Definition). Именем профиля назначим Pr. Phosphorus, тип профиля (Profile Type) определим как Гауссиану (Gaussian), а примесь (Species) – фосфор (PhosphorusActiveConcentration). Далее требуется задать параметры, необходимые для построения Гауссианы: пиковую концентрацию (Peak

Concentration) == 7.5E16 см⁻³, положение максимума относительно базовой линии (*Peak Position*) == 0 мкм, концентрацию, при которой возникает *p*–*n*-переход (*Junction*) == 6.8E14 см⁻³ и глубину залегания перехода (*Depth*) == 0,3 мкм. Важно также указать параметры латерального (бокового) распространения примеси (*Lateral Diffusion*), а именно функцию распределения в латеральном направлении (*Gaussian vs Error Function*), способ определения спада примеси (*Factor vs Standard Deviation vs Length*) и соответствующее последнему параметру значение. В качестве функции выберем Гауссиану, а спад будет реализован посредством параметра *Factor* со значением 0,8. В качестве направления распространения профиля относительно базовой линии (*Eval Direction*) выберем направление перпендикулярно вниз от маски в подложку.

• Создание сетки

Сначала определим глобальную стратегию построения сетки в подложке. Выполним цепочку: Mesh > Refinement Placement. и заполним поля диалогового окна Refinement Specification. Имя размещения (Placement Name) – Pl.Global, Placement Type – Region == R.Substrate. В блоке Refinement Definition необходимо указать параметры непосредственно стратегии распределения: имя стратегии (Name) == RD.Global, максимальные и минимальные размеры элемента в трехмерном пространстве. Так как в данной работе рассматривается 2D случай, то Z координата всегда равна 0, а в направлениях X и Y для глобальной стратегии выберем постоянное разбиение с размером элемента 0,1 мкм. Параметр Refinement Function отвечает за перестроение сетки (как правило, за сгущение) в зависимости от выбранного критерия. Выберем Gradient – Phosphoru-SActiveConcentration со значением Value == 1. После этого необходимо нажать кнопку Add, чтобы добавить функцию перестроения (Refinement Function) в список и затем жмем кнопку Add Placement.

Теперь можно перейти к перестроению сетки в области аналитического профиля. Гладкость профиля или границы раздела *p*-*n*-перехода определяют не только параметры профилей легирования, но и размеры элементов сетки на соответствующих границах раздела. Поэтому перестроим сетку в прямоугольной области, охватывающей аналитический профиль и его окрестности. Для этого сначала создадим область преобразования (*Refinement/Evaluation Window*), которая в отличие от базовой линии будет прямоугольником с именем *RW.Profile*. Координаты двух его противоположных вершин – (0,5 ; 2), (1,5 ; 1,5). Затем вызовем диалоговое окно *Refinement Specification*. Заполняем его поля следующими данными: (*Placement Name*) – *Pl.Profile*, *Placement Type* – *Ref/Win* == *RW.Profile*. Все размеры будут 0,01 мкм. Параметр *Refinement Function* остается без изменений. В завершении перестроения жмем кнопку *Add Placement*.

Собственно само построение сетки и профилей легирования осуществляется не в SSE, а с помощью другого приложения – генератора сеток, к которому происходит обращение из SSE в соответствии с определенными выше параметрами. Это обращение осуществляется через меню Mesh > Build Mesh. При этом появляется диалоговое окно (рис. 3.25), в котором можно выбрать один из трех различных генераторов для построения сетки (Mesh, SnMesh, NoffSet3D). Следует задать SnMesh. Более подробную информацию об особенностях каждого сеточного генератора следует искать в руководствах пользователя. После выбора конкретного генератора диалоговое окно модифицируется в зависимости от его параметров. Так как выше уже была задана примитивная стратегия построения сетки, то заполнение полей диалогового окна, относящихся к параметрам разбиения, следует опустить. В качестве средства визуализации полученного результата здесь можно использовать, как приложение SSE, так и Tecplot SV. Выбираем Tecplot_SV и жмем *BuildMesh*.

3.2.4. ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ С ПРИЛОЖЕНИЕМ SDEVICE

Основные области применения приложения *SDevice* показаны на рис. 3.2, а структура входных и выходных файлов – на рис. 3.3.

SDevice



Рис. 3.2. Основные области применения SDevice



Puc. 3.3. Основные типы входных и выходных файлов для SDevice

К главным классам доступных в *SDevice* физических моделей, описывающих перенос носителей заряда в различных полупроводниковых материалах, таких как кремний или германий, арсенид галлия или карбид кремния, тройных соединениях и т.д., относятся (по мере усложнения):

• классическая диффузионно-дрейфовая модель (DD) на основе ФСУ (рис. 3.4);

• термодинамическая модель (*DD* плюс уравнение теплопроводности) (рис. 3.5);

• гидродинамическая модель – *HD* (термодинамическая модель плюс уравнения переноса энергии для электронов и дырок) (рис. 3.6).

Во всех этих приближениях учитываются все известные в настоящее время физические механизмы процессов генерации/рекомбинации, эффекты возникающие в сильных полях (горячие электроны, туннелирование в потенциальных барьерах, насыщение дрейфовой скорости и ее всплеск – over-shoot (только в HD) и т. д.). Многообразные, хорошо откалиброванные модели подвижностей для электронов и дырок используются с учетом влияния температурных, концентрационных, полевых и механических эффектов, связанных с анизотропией кристаллов. Возможно моделирование оптических процессов и эффектов, связанных с захватом на ловушки, магнитным полем и т.д. За более подробной информацией следует обратиться к соответствующему руководству пользователя.

Уравнение Пуассона:
$$\nabla \varepsilon \cdot \nabla \psi = -q \Big(p - n + N_{D^+} - N_{A^-} \Big)$$
Уравнение непрерывности для
электронов: $\nabla \cdot \overrightarrow{J_n} = qR + q \frac{\partial n}{\partial t}$ Уравнение непрерывности для
дырок: $-\nabla \cdot \overrightarrow{J_p} = qR + q \frac{\partial p}{\partial t}$ Плотность тока: $\overrightarrow{J_p} = -pq\mu_p(\nabla \phi_p + P_p \nabla T)$ $\overrightarrow{J_n} = -nq\mu_n(\nabla \phi_n + P_n \nabla T)$

Рис. 3.4. Система основных уравнений для диффузионо-дрейфовой модели

Плотность тока:

$$\vec{J}_p = -pq\mu_p(\nabla\phi_p + P_p\nabla T)$$
 $\vec{J}_n = -nq\mu_n(\nabla\phi_n + P_n\nabla T)$

Рис. 3.5. Система уравнений для плотности токов в термодинамической модели

Плотность тока
электронов:
Плотность тока
дырок:

$$\vec{J}_n = q\mu_n \Big(n\nabla E_C + k_B T_n \nabla n + f_n^{td} k_B n \nabla T_n - 1.5nk_B T_n \nabla \ln m_e \Big)$$

 $\vec{J}_p = q\mu_p \Big(p \nabla E_V - k_B T_p \nabla p - f_p^{td} k_B p \nabla T_p - 1.5pk_B T_p \nabla \ln m_b \Big)$

Рис. 3.6. Система уравнений для плотности токов в гидродинамической модели

Так как точное моделирование процесса переноса электронов и дырок поперек канала в нанотранзисторах, например в МОПТ с относительно тонким диэлектриком и высокой плотностью легирующей примеси в канале, возможно только при учете квантово-механических эффектов [13] (рис. 3.7), то данное явление также доступно для расчета в *SDevice*.



Плотность электронов, проникающих через потенциальный барьер, полученная при помощи уравнений Шредингера-Пуассона, методом градиента плотности и классическим методом

Рис. 3.7. Моделирование квантово-механических эффектов

Решение возникающих при этом многомерных краевых задач в *SDevice* основано на методе конечных элементов. Причем для их эффективного численного решения используются такие способы генерации сетки, которые учитывают высокие градиенты концентрации носителей заряда, возникающие в различных областях исследуемого прибора. В этих условиях основной объем машинных вычислений приходится на решение систем линейных уравнений с разряженными матрицами очень большого размера. Среднее количество узлов на один прибор может составлять величину порядка $5 \cdot 10^4$. Для современных компьютеров решение подобных систем возможно только на основе быстросходящихся итеративных методов.

3.2.5. СТРУКТУРА ЗАДАЧ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

Лабораторная работа состоит из трех частей: А, В и С.

В части \hat{A} необходимо рассчитать с помощью оболочки *SWB* ВАХ двух диодных структур при прямом и обратном смещениях *p*–*n*-переходов, с различным расположением электрических контактов (рис. 3.8).







Рис. 3.8. Расположение контактов в исследуемых диодных структурах: *a* – структура *AA*; *б* – структура *AB*

Дополнительно к ВАХ здесь же требуется найти величину напряжения пробоя в соответствии со своим вариантом задания, приведенным в табл. 3.1, а также исследовать зависимость напряжения пробоя от расстояния между контактами для структуры AB.

Таблица 3.1

Технологические	Номер бригады								
параметры	1	2	3	4	5				
Доза легирования, см ⁻²	$\begin{array}{c} 1 \cdot 10^{12} \\ 3 \cdot 10^{13} \\ 5 \cdot 10^{14} \end{array}$	$\begin{array}{c} 1 \cdot 10^{13} \\ 3 \cdot 10^{14} \\ 5 \cdot 10^{15} \end{array}$	$\begin{array}{c} 5\cdot 10^{12} \\ 7\cdot 10^{13} \\ 9\cdot 10^{14} \end{array}$	$\begin{array}{c} 2 \cdot 10^{12} \\ 4 \cdot 10^{13} \\ 8 \cdot 10^{14} \end{array}$	$\begin{array}{c} 8\cdot 10^{13} \\ 4\cdot 10^{14} \\ 1\cdot 10^{15} \end{array}$				
Время разгонки, мин	5	5	5	5	5				

Варианты заданий по бригадам для структуры АА

Для структуры *AB* расстояние между контактами следует принять равными 1, 1,5 и 2 мкм, время разгонки – 10 мин, а дозу легирования взять как среднюю величину от диапазона доз в варианте задания. Планы вычислительных экспериментов для структур *AA* и *AB* показаны на рис. 3.9 и 3.10 соответственно.

Project	Scheduler										
	Family Tree										
		Dose	Time	2610000201	Sentenuese	Sentender					
1		2000	1								
2		1.00e12	5								
3	1		10								
4	1		1								
5	1	3.00e13	5								
6]		10								
7			1								
8		5.00e14									
9			10								

Рис. 3.9. Вычислительный поток и план вычислительного эксперимента для структуры *АА*

Project	Scheduler											
	Family Tree											
		ł										
		SentaurusP		SentaurusSE	SeniaurusD	SeniaurusD						
		Time	LCont									
1			1									
2		1	1.5									
3			2									
4			1									
5		5	1.5									
6			2									
7			1									
8		10	1.5									
9			2									

Рис. 3.10. Вычислительный поток и план вычислительного эксперимента для структуры *АВ*

В части B необходимо провести анализ электрофизических характеристик структуры напряженного и ненапряженного *n*-МОПТ на основании уже подготовленного и просчитанного проекта *Strain_NMOSFET* (рис. 3.11). Выходную ВАХ нужно построить с учетом трех различных ситуаций при моделировании: когда в *сар*-пленке нет механических напряжений, когда они есть, но не учитываются в модели подвижности *SDevice*, когда они есть и учитываются в модели подвижности (рис. 3.12).

Project	Scheduler																																		
	Family Tree																																		
			L urusP		SaniaurusSE		Same (150																												
		Lg	Strain	backend			Strain_device	IV	Vg	Vd																									
1		ĺ						ld)/a	1.25	0.05																									
2			0	0	1			yes	lavg	1.20	1.25																								
3																																	ldVd	1.25	1.25
4								ld\/a	1.25	0.05																									
5		50					yes	luvy	1.20	1.25																									
6			1					ld∀d	1.25	1.25																									
7				1				ld\/a	1.25	0.05																									
8							no	luvy	1.25	1.25																									
9						ld∀d	1.25	1.25																											

Рис. 3.11. Вычислительный поток и план вычислительного эксперимента для структуры *n*-МОПТ


Рис. 3.12. Выходные ВАХ *n*-МОПТ при различных способах моделирования

В части C, являющейся альтернативным вариантом сквозного моделирования структуры из части A, необходимо сконструировать диод AA в редакторе структур *SSE* и провести расчет его BAX.

3.3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Приступить к выполнению части *A*. Для этого перенести готовый проект *Lab_3aa* в свою рабочую директорию. Заполнить данные для вычислительного эксперимента в соответствии с номером бригады. Выделить узлы с t = 5 мин, соответствующие приложениям *SProcess*, *SSE*, *Sdevice*, и запустить их на расчет. При этом интерактивный режим работы *SSE* должен быть отключен (*Batch mode*).

2. В процессе расчета *SProcess* посмотреть структуру командного файла, переписать его на флешку и найти в нем команды, задающие контакты к структуре. Дома этот командный файл **подробно** откомментировать на русском языке и привести его в отчете по лабораторной работе. После выполнения первого узла *SProcess* построить 2D изображение *p*–*n*-перехода в визуализаторе. Дома по этому рисунку

описать в соответствующей системе координат геометрию контактов, сопоставив ее с командным файлом.

3. В процессе расчета *SSE* просмотреть его командный файл, переписать на флешку и дома описать структуру с подробными комментариями на русском языке. В визуализаторе *Tecplot_SV* построить 2D изображения распределения активной примеси в структурах по файлам **_fps.tdr*. По завершении расчета *SSE* визуально сравнить с помощью оболочки *Tecplot_SV* для какого-нибудь одного варианта дозы, как меняется расчетная сетка при переходе от *SProcess* к *SSE* (смотреть файлы **_fps.tdr* и **_msh.tdr* соответственно рис. 3.13).



Puc. 3.13. Сравнение расчетных сеток SProcess и SSE

4. В процессе расчета *SDevice* просмотреть его командные файлы для прямой и обратной ветвей ВАХ и переписать их на флешку. Дома описать структуры этих файлов с подробными комментариями на русском языке. При этом отдельно перечислить все задействованные модели физических процессов. Для просмотра полученных результатов использовать визуализатор *Inspect* (рис. 3.14). В отчете отметить различие смоделированных прямой и обратной ветвей ВАХ.

Eile Edit Curve S	cript Extensions Help		
<u>⊯</u> ⊜o €€\$. 🗆 🔍 🔳 🖩 🖌 👁	•••	1 1 X 1 Y 1 Z
Datasets	Curves	-	
Fick_des	TotalCurren, Ander		
To X-Avis To Left Y-Avis To Right Y-Avis	New Edit	- - - 0 -	
		Fil	

Рис. 3.14. Просмотр смоделированной прямой ВАХ диода в Inspect

5. После завершения расчетов в визуализаторе *Inspect* построить график прямой ветви ВАХ в зависимости от дозы легирования *n*-области. Для этого отметить под иконкой *Inspect* нужные узлы и с помощью правой кнопки перейти к *Visualize* > .plt-files. В открывшемся окне в левом верхнем углу выделить, если это необходимо, нужные файлы. Затем следует выбрать электрод, на котором меняется напряжение (анод). Далее входное напряжение (*Inner Voltage*) задаем в качестве переменной для оси X, а общий ток (*Total Current*) – в качестве переменной для Y.

6. В визуализаторе *Tecplot_SV* для прямой ветви построить 2D изображения распределений следующих параметров структуры: потенциалов; плотности электронов и дырок; плотности общего тока, текущего в структуре, а также его электронной и дырочной компонент; электростатического поля; различных темпов генерации-рекомбинации; распределения подвижности. Все эти изображения привести в отчете.

7. В визуализаторе *Inspect* построить график обратной ветви ВАХ (с логарифмической шкалой по оси *Y*) в зависимости от дозы легирования *n*-области аналогично пункту 5 и определить по нему зависимость напряжения пробоя от дозы легирования. Дома построить график этой зависимости и привести его в отчете.

8. В визуализаторе *Tecplot_SV* для обратной ветви определить по распределению темпа ударной ионизации (*ImpactIonization*) место пробоя *p-n*-перехода (подобно рис. 3.15) в зависимости от дозы легирования и привести изображения места пробоя в отчете.



Рис. 3.15. Определение места пробоя по темпу ударной ионизации

9. Приступить к анализу структуры *AB*. Для этого нужно переписать готовый проект в рабочую директорию, запустить его на расчет, построить график обратной ветви ВАХ. Найти напряжение пробоя в зависимости от расстояния между контактами, а также найти место пробоя и привести все эти данные в отчете.

10. Приступить к выполнению части **B**. Для этого готовый проект *Strain_NMOSFET* переписать к себе в рабочую директорию. Затем следует изучить структуру плана вычислительного эксперимента (см. рис. 3.11) и в отчете по работе привести его словесное описание. В отчете также необходимо подробно описать технологию изготовления напряженного транзистора, соответствующую командному файлу.

Для варианта с напряженной пленкой в соответствии с командным файлом *SProcess* в визуализаторае *Tecplot_SV* построить итоговой вид структуры *n*-МОПТ, а также привести вид структуры на промежуточных этапах моделирования. В отчете указать расположение *LDD*, *Halo*-

областей и *сар*-пленки [2]. В визуализаторе *Inspect* построить одномерные сечения профилей распределения бора, мышьяка и фосфора в канале транзистора, а также в областях исток-стоков.

По уже имеющимся результатам расчетов построить графики выходных характеристик *n*-МОПТ для напряженного и ненапряженного транзисторов. Характеристики следует строить для одного варианта структуры с учетом трех возможных вариантов моделирования:

- механических напряжений в *сар*-пленке нет;

– механические напряжения в *сар*-пленке есть, но модель, учитывающая их влияние на подвижность электронов в канале МОПТ, выключена;

– механические напряжения в *сар*-пленке есть и модель, учитывающая их влияние на подвижность, включена (рис. 3.12).

11. Приступить к выполнению части *С*. Для этого в новом окне *Терминала* запустить графический конструктор структур *SSE* по команде *SDE* (см. рис. 3.16) и выполнить в нем необходимые предустановки в соответствии с инструкцией, приведенной в разделе 3.2.3.



Рис. 3.16. Общий вид окна SSE после запуска в графическом режиме

Последовательность действий при конструировании структуры *p*–*n*-перехода должна быть следующей:

1) создаем подложку в виде прямоугольной области из кремния размером 2 × 2 мкм;

2) создаем защитный слой двуокиси кремния толщиной 200 нм (рис. 3.17);



Рис. 3.17. Кремниевая подложка со слоем SiO₂

3) формируем Т-образную область с именем *R.Contact* из алюминия под контакт;

4) определяем контакты: Anode внизу подложки (красный) и Cathode по T-образной области (зеленый) (рис. 3.18) и активируем их (рис. 3.19);

Conta Conta	ct Sets (на ksref9.ref.nstu.ru)	×
Defined Contact Sets	Contact Name: Anode Edge Color: 1 0 0 Edge Thickness: 6 Face Pattern: ## 🜩	
Activate	Set Delete Close]

а

Рис. 3.18. Вид окна при определении списка контактов:

а – анода; б – катода с Т-образной областью из алюминия

Auminum	¢ base	none	Select Body	●	
	ľ		<u> </u>	-	
			Contact Sets (н	a ksref9.ref.nstu.ru)	X
		Defined Contact Sets	Contact N	ame: Cathode	
		Anode			
			Edge Colo	r: 0 1	0
			Edge Thick	ness: 6	Face Pattern: ## 🗢
		·			
		Activate	Se	t Delete	Close

б

Рис. 3.18. Окончание

 Приложения Переход Система 					user 🗇	📰 🤹 Чтв. 29 Апр. 11:44 🖉
File Fold View Draw Mesh Device Contacts He	No.			und a source (a. a) (na karetarenna		
	C base	Cathode	C Select Body			اونوني الاحد
Roxco to the stat		_				
âu x						

Рис. 3.19. Вид окна SSE после активации контактов

5) определяем профили легирования *p*-*n*-перехода: равномерный профиль в подложке из примеси бора с концентрацией $6,74 \cdot 10^{14}$ см⁻³ (КДБ-20) (рис. 3.20) и аналитический 2D профиль гауссового типа для фосфора (рис. 3.21);

б) определяем сетку в соответствии с рис. 3.22 – 3.25;

7) просматриваем получившуюся структуру в *Tecplot_SV* (рис. 3.26).

Constant	Profile Placement (на ksref9.ref	i.nstu.ru) 🛛 🗙
Placement Name	PI.Constant	\$
Placement Type		Visualization
🔾 Ref/ Win	\$	Show
Region	R.Substrate	Hide
🔘 Material	Silicon	
Constant Profile Definitio	n	
Species	BoronActiveConcentration	
Concentration	6.8e+14	
Decay Factor	0 🗌 On	Replace
Change Placement	Delete Placement	Close

Рис. 3.20. Вид окна *Placement* при определении параметров постоянного профиля легирования подложки примесью бора

 Analytical Profiles (на 	a ksref9.ref.nstu.ru)) 🛛 🗙
Placement Name PLAnalytical	Ref/Win RW.Baseline	\$
Profile Definition		
Name Pr.Phosphorus 🗢	Profile Type Gaussian	\$
Species PhosphorusActiveConcentration		
Concentration		
Peak Concentration	7.5E16	
Peak Position	D	
Junction 🗢	5.8E14	
Depth	0.3	
- Lateral Diffusion		
Gaussian 🗢 Factor	€ 0.8	
EvalWindow -	Eval Direction	Visualization
Ref/Win RW.Baseline	O Bositive	Show
Material Silicon	Negative	Hide
Decay Length		
	Replace	Not Eval
Add Placement Delete Placemen	t	Close

Рис. 3.21. Вид окна *Placement* при определении параметров аналитического профиля легирования подложки примесью фосфора

Refi	nement Specificatior	ı (на ksref9.	ref.nstu.ru)	×
Placement Name	PI. Global		\$	
Placement Type			- Visualization	
O Ref/ Win	RW.Baseline	÷	Show	
Region	R.Substrate	•		\exists
Material	Silicon	•	Hide	
Refinement Definition Name RD.Global		÷		
	X Direction	V Direction	Z Direction	n
Max Element Size	0.1	0.1	0	
Min Element Size	0.1	0.1	0	
Refinement Functions Value Difference Gradient Interface Length	PhosphorusActiveConcent	ration 🗢	value 1	
Function / Interface PhosphorusActiveCo	Criteria ncentration Gradient	Value Factor	Double Side	Add Delete
Change Placement	Delete Placement		[Close

Puc. 3.22. Вид окна Refinement Specification при определении стратегии построения сетки



Рис. 3.23. Вид фрагмента окна *SSE* после определения области под аналитический профиль легирования *n*-типа

🗖 Refi	nement Specificatio	n (на ksref9.	ref.nstu.ru)	×
Placement Name	PI.Global		\$	
Placement Type			- Visualization	
Ref/ Win	RW.Profile	•	Show	
O Region	R.Substrate	\$		=
🔾 Material	Silicon	\$	Hide	
Refinement Definition				
Name RD.Global		\$		
Max Element Size Min Element Size	X Direction 0.01 0.01	V Direction 0.01 0.01	Z Directio	on
Refinement Functions Value Difference Gradient Interface Length	BoronActiveConcentration	• •	value 1	
Function / Interface PhosphorusActiveCo	Criteria ncentration Gradient	Value Factor	Double Side	Add Delete
Change Placement	Delete Placement			Close

Puc. 3.24. Вид окна Refinement Specification при задании параметров перестроения сетки

Save Grid to File:	Build Mesh (Ha ksref9;ref.nstu;ru) 🛛 🛽
/home/tcad_home/tcad1	0/DB/Work_Students/Smirnov/SDE/Diode Browser
Meshing Engine	Noffset O Mesh Viewer O SDE Tecplot SV O None
- Sentaurus Mesh Comr	nand-Line Options
Axis-aligned (-a)	O Tensor-product (-t)
Max. Vertices (-m)	Mesh Type (-c) boxmethod
Rounding (-e)	
Max. Angle (-n)	Disable Disable Boundary Decimation (-d)
Accuracy (-g)	Boundary Optimization (-j)
Adjacent Ratio (-r)	Binary Tree Smoothing (-s)
Aspect Ratio (-×)	
Other Options:	
Cmd File Append:	
	Save Values Build Mesh Cancel

Рис. 3.25. Вид окна *Build Mesh* при выборе генератора сетки и 2*D* визуализатора



Рис. 3.26. Вид 2*D* концентрационного профиля активной примеси в *p*-*n*-переходе

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Перечислите и опишите основные типы приборов, которые можно моделировать с помощью *SDevice*.

2. Какие файлы, содержащие в себе полную геометрическую информацию об области моделирования, профилях легирования и сетке, передаются из SSE в SDevice при сквозном моделировании полупроводниковых структур?

3. В чем состоит разница между технологической и электрофизической областями моделирования и какие команды в приложении *SProcess* используются для согласования этих областей, если это необходимо?

4. Какие файлы следует просматривать в приложении *Tecplot_SV*, для того чтобы сравнить расчетные сетки, получающиеся после *SProcess* и *SSE*?

5. Нарисуйте координатные оси, используемые в приложениях *SProcess*, *SSE* и *SDevice*.

6. Поясните, какие файлы, отражающие работу SDevice, можно «посмотреть» в Inspect.

7. Каким образом по результатам расчета *SDevice* можно определить место пробоя *p*–*n*-перехода?

8. Как можно посмотреть результаты расчета *SDevice*, отражающие распределение потенциала и концентрации электронов и дырок в моделируемой структуре?

9. Поясните, в каких выходных файлах *SDevice* содержится информация о распределении темпа ударной ионизации в моделируемой полупроводниковой структуре.

10. Опишите, каким образом в оболочке *SWB* можно посмотреть графики BAX, рассчитанные в *Sdevice*. Какие файлы для этого следует использовать?

11. Если в вычислительном эксперименте оболочки *SWB* исследовалось влияние дозы легирования на ВАХ *p-n*-перехода, то каким образом можно построить график, отражающий эту зависимость?

12. Для чего при построении графика ВАХ в оболочке *Inspect* необходимо выбрать определенный контакт? Поясните, каким образом это можно сделать.

13. Опишите, каким образом в *SDevice* моделируется влияние механических напряжений на характеристики прибора.

14. Опишите, в чем состоит разница между диффузионно-дрейфовой и гидродинамической моделями, и что в них общего.

15. Проведите сравнение диффузионно-дрейфовой и термодинамической моделей.

16. Перечислите и опишите модели процессов генерации/рекомбинации носителей заряда, используемые в *SDevice*.

17. При моделировании каких эффектов в *SDevice* используются квантово-механические модели?

18. С помощью каких моделей можно в *SDevice* рассчитывать эффект всплеска дрейфовой скорости электронов и в чем состоит суть этого явления?

19. Поясните общий принцип учета эффекта механических напряжений в *SDevice*. В каком приложении системы *Sentaurus* осуществляется численный расчет компонент тензора механических напряжений?

20. Объясните, из каких результатов расчета, проведенных в лабораторной работе, следует, что быстродействие *n*-МОПТ увеличивается, если эффект влияния механических напряжений имеет место.

21. Каким образом и по какой команде можно запустить редактор структур *SSE* при условии его параллельной работы с оболочкой *SWB*?

22. Опишите методику конструирования кремниевой подложки с масочным слоем двуокиси кремния при работе в интерактивном режиме *SSE*? 23. В каком приложении системы *Sentaurus* осуществляется формирование расчетной конечно-элементной сетки?

24. Перечислите доступные в SSE типы 2D аналитических аппроксимационных профилей легирующих примесей и поясните, каким образом в лабораторной работе в SSE конструировалась область *p-n*перехода.

25. Какими параметрами в конструкторе *SSE* можно описать исходную кремниевую подложку и каким образом при этом можно учесть ее ориентацию?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И ХАРАКТЕРИСТИК НЕМТ-СТРУКТУР В TCAD SENTAURUS

4.1. ЦЕЛЬ И СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Цель работы – освоение методик моделирования ВАХ и электрофизических параметров транзисторов с высокой подвижностью электронов – *HEMT (High Electron Mobility Transistor)* на основе гетероструктур GaAs/Al_xGa_{1-x}As.

Содержанием работы являются изучение методики взаимосвязанной работы приложений SSE и SDevice с целью установления зависимости между конструктивно-технологическими параметрами HEMTтранзистора (длиной канала, толщиной широкозонной области гетероперехода, степенью ее легирования и величиной мольной доли x) и его передаточными и выходными BAX транзистора, а также исследование принципов работы HEMT.

4.2. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

4.2.1. ОПИСАНИЕ МОДЕЛИРУЕМОЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ СТРУКТУРЫ

Общий вид моделируемой структуры приведен на рис. 4.1.

Принцип действия *HEMT* основывается на управлении напряжением на затворе состоянием квантовой ямы, возникающей в узкозонном материале GaAs в гетеропереходе $Al_XGa_{1-X}As/GaAs$ [4–6, 19], что подробно рассматривалось в курсе «Физика полупроводниковых приборов». При нулевом или небольшом отрицательном напряжении на затворе в квантовой яме имеется несколько энергетических уровней, которые заполняются электронами из сильнолегированного *n*-слоя $Al_XGa_{1-X}As$. В результате этого от истока к стоку формируется канал *n*-типа и при подаче напряжения между этими электродами в транзисторе потечет ток, образованный двумерным электронным газом в квантовой яме. При увеличении отрицательного напряжения на затворе изгиб зон в квантовой яме начинает «распрямляться» и количество энергетических уровней и электронов в ней – уменьшаться (яма «мелеет»). Ток стока при этом будет уменьшаться. При значительном напряжении на затворе уменьшение изгиба зон в GaAs приводит к полному исчезновению квантовой ямы. Канал обедняется, и ток стока становится равным нулю.



Рис. 4.1. Принципиальная 2D структура НЕМТ

Моделирование структуры базируется на использовании приложений SSE и SDevice. Общий вид проекта для расчета параметров и характеристик структуры на основе командных файлов sde_dvs.cmd и sdevice_des.cmd в оболочке SWB имеет вид в соответствии с рис. 4.2. В данном иллюстративном проекте варьируемым параметром выбрана длина канала HEMT.

🐔 Applications Places Desktop 🕐 📦 🔛									Thu Ap	r 30, 11:00	:08 PM [
			ab_rajHEM1						_)
Enject Edit Scheduler View Scienario Tool Parameter Experime	nts Node	Vagiables	_	Calibration	Egensions .	gelp					
🗅 🚅 🖬 💠 🕲 🛪 🐰 🗞 🗞 🐑 Scenario all		<u>.</u>	, II , T E	× (X ¥ [1 24 69 4] ខេ ឆ			
Projects	j Project	Scheduler									
Dr // none/cad_hometcad3/C0						Family Tre					<u>a</u>
MAKAROV Students								36			
Dtesh	antranat									100	
D- examples		h_NGaAs	n_AlGaAs	Lg	x_AlGaAs	Vgmin	Vgmax	Vd	Vg	kiVd.	
¢ _I ⊡ HEMTs	1			0.2	0.3	-5.0	0.0	0.05	0.0	D	
B-D GAAs 2	2					-5.0	0.0	15.0	0.0	0	
B-GaN	4	0.05	1E18	0.31	0.3	0.0	0.0	15.0	0.0	-	
10-EL140_3	5					-5.0	0.0	0.05	0.0	D	1 - U
I	6			0.4	0.3	0.0	0.0	15.0	0.0	1	
HENT_DC											
HEMT_DC_02											
HEMT_DC_03											_
HEMI_DC_3D											
Dr 1,500					-						

Рис. 4.2. Структура проекта в SWB для расчета НЕМТ

Проектирование конструктивной структуры *HEMT* реализуется в редакторе *SSE* на основе командного файла *sde_dvs.cmd*.

Расчет передаточных и выходных ВАХ в приложении SDevice производится на базе командного файла sdevice_des.cmd, структура которого приводится ниже. При моделировании ВАХ используется гидродинамическое приближение прибора.

4.2.2. КОМАНДНЫЙ ФАЙЛ ПРИЛОЖЕНИЯ SDEVICE

```
Electrode{
 { Name="source" Voltage=0.0 Resistor= 150 }
 { Name="drain" Voltage=0.0 Resistor= 150 }
 { Name="gate" Voltage=0.0 Schottky Barrier=0.4
   eRecVelocity=1.e7 hRecVelocity=1.e7 }
 { Name="substrate" Voltage=0.0 Resistor= 1e3 }
File{
 Grid = "@tdr@"
 Current = "@plot@"
 Output = "@log@"
 Plot = "@tdrdat@"
 Param = "@parameter@"
ł
Physics {
 Hydrodynamic( eTemperature )
 Mobility(
   HighFieldSaturation(CarrierTempDrive)
 )
 EffectiveIntrinsicDensity(NoBandGapNarrowing)
 Recombination(
   SRH Auger Radiative
   Avalanche(CarrierTempDrive)
ļ
Physics( Material="GaAs" )
 Mobility(Dopingdependence)
ł
```

#-----#
Physics(Material="AlGaAs"){
MoleFraction(xFraction=0.30 Grading=0)
}
#----#

Plot{

*--Density and Currents, etc eDensity hDensity TotalCurrent/Vector eCurrent/Vector hCurrent/Vector eMobility hMobility eVelocity hVelocity eQuasiFermi hQuasiFermi

*--Temperature eTemperature * hTemperature Temperature

*--Fields and charges ElectricField/Vector Potential SpaceCharge

*--Doping Profiles Doping DonorConcentration AcceptorConcentration

*--Generation/Recombination SRH Auger AvalancheGeneration eAvalancheGeneration hAvalancheGeneration

*--Driving forsdeviceces eGradQuasiFermi/Vector hGradQuasiFermi/Vector eEparallel hEparalllel

*--Band structure/Composition BandGap * BandGapNarrowing Affinity ConductionBand ValenceBand xMoleFraction

```
*--Traps
 eTrappedCharge hTrappedCharge
 eGapStatesRecombination hGapStatesRecombination
*--Heat generation
 * TotalHeat eJouleHeat hJouleHeat RecombinationHeat
ł
Math{
 Extrapolate
 Digits = 5
 Notdamped=50
 Iterations=15
 RelErrControl
 ErrRef(Electron) = 1e7
 ErrRef(Hole)
             = 1e7
 RelTermMinDensity = 1e4
 RelTermMinDensityZero = 1e7
}
Solve{
*- Initial Solution:
 Coupled(Iterations=100){ Poisson }
 Coupled{Poisson Electron Hole }
 Coupled { Poisson Electron Hole eTemperature }
#------#
#- IdVg
\#if @IdVd@ == 0
#-----#
*- Gate/Drain ramping to IdVg starting point:
 Ouasistationary(
   InitialStep=5e-2 Increment=1.25
   Minstep=1e-5 MaxStep=0.2
   Goal{ Name="drain" Voltage= @Vd@ }
   Goal{ Name="gate" Voltage= @Vgmax@ }
 ){ Coupled{ Poisson Electron Hole eTemperature } }
```

NewCurrentFile="IdVg"

```
*- IdVg sweep:
 Quasistationary(
   InitialStep=5e-3 Increment=1.25
   Minstep=1e-5 MaxStep=0.025
   Goal{ Name="gate" Voltage= @Vgmin@ }
   DoZero
 ){ Coupled{ Poisson Electron Hole eTemperature }
   CurrentPlot(Time=(Range=(01)Intervals=40))
   Plot(FilePrefix="n@node@" NoOverwrite
    Time = (Range = (0 \ 0.5) \ Intervals = 1))
 }
#-----#
#- IdVd
#else
#-----#
 Quasistationary(
   InitialStep=1e-2 Increment=1.25
   Minstep=1e-5 MaxStep=0.2
   Goal{ Name="gate" Voltage= @Vg@ }
 ){ Coupled{ Poisson Electron Hole eTemperature } }
  NewCurrentFile="IdVd @node@"
  Ouasistationary(
   DoZero
   InitialStep=1e-3 Increment=1.5
   MinStep=1e-5 MaxStep=0.05
   Goal { Name="drain" Voltage= @Vd@ }
  ){ Coupled { Poisson Electron Hole eTemperature }
    CurrentPlot(Time=(Range=(0 0.3) Intervals=30
        Range = (0.3 \ 1.0) Intervals = 20)
 ł
#endif
```

}

4.3. СТРУКТУРА ЗАДАЧ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

Лабораторная работа состоит из трех частей: А, В и С.

В части A необходимо рассчитать ВАХ диода (прямую и обратную ветви), структура которого была получена в лабораторной работе 3 в интерактивном режиме *SSE*, и сравнить результаты расчета с диффузионным *p*–*n*-переходом, исследованным в той же работе (вариант *AA*).

В части **B** требуется, проанализировав подготовленные командные файлы *sde_dvs.cmd* и *sdevice_des.cmd*, создать проект в *SWB* и сформировать план вычислительного эксперимента, аналогичного приведенному на рис. 4.2. Затем нужно в соответствии со своим вариантом задания, приведенным в табл. 4.1, модифицировать план таким образом, чтобы было возможно установить влияние варьируемого параметра на ВАХ транзистора.

В части *С* следует посредством моделирования проиллюстрировать принцип действия *HEMT*, графически показав процессы «обмеления» ямы и отсечки канала транзистора.

Таблица 4.1

Ho-	Технологические параметры										
мер	Варьируемь	лй		Остальн	ые						
ори- гады	Наименование	диапазон	h_AlGaAs, мкм	n_AlGaAs, см ⁻³	x_AlGaAs	Lg, мкм					
1	Длина канала, мкм	0,5; 0,31; 0,4	0.05	10 ¹⁸	0,3						
2	Толщина области Al _x Ga _{1-x} As	0,04; 0,05; 0,06	-	10 ¹⁸	0,3	0,2					
3	Степень легирова- ния $Al_xGa_{1-x}As$, см ⁻³	$\begin{array}{c} 2*10^{17} \\ 5*10^{17} \\ 1*10^{18} \end{array}$	0,05	_	0,3	0,2					
4	Степень легирова- ния $Al_xGa_{1-x}As$, см ⁻³	$3*10^{17} \\ 7*10^{17} \\ 2*10^{18}$	0,05	_	0,3	0,2					
5	Мольная доля <i>х</i> в Al _x Ga _{1-x} As	0,3: 0,4; 0,5	0,05	10 ¹⁸	_	0,2					

Варианты заданий по бригадам для части В

Для части **В** в процессе расчета необходимо учесть следующие особенности вариантов:

– при вариации по длине затвора: предполагаемые значения Lg – 0,2; 0,31 и 0,4 мкм; при этом остаются постоянными значения мольной доли алюминия в Al_xGa_{1-x}As – x_AlGaAs = 0,3, величина уровня легирования донорами широкозонного слоя Al_xGa_{1-x}As – n_AlGaAs = 10^{18} см⁻³ и толщина – h_AlGaAs = 0,05 мкм;

параметры электрофизического моделирования в данном случае выбираются следующим образом: для передаточной характеристики (IdVd = 0) – минимальное напряжение на затворе Vgmin = -5,0 B, максимальное напряжение на затворе Vgmax = 0 B, а напряжение на стоке Vd = 0,05 B, причем параметр Vg не используется; для выходной BAX (IdVd = 1) параметры Vgmax и Vgmin не используются, а Vd = 15 B и Vg = 0,0 B;

– при вариации по толщине широкозонного материала: предполагаемые значения $h_AlGaAs - 0,04$; 0,05 и 0,06 мкм; при этом остаются постоянными значения мольной доли алюминия в $Al_xGa_{1-x}As - x_AlGaAs = 0,3$, концентрация доноров – n_AlGaAs = 10^{18} см⁻³ и длина затвора Lg = 0,2 мкм;

параметры электрофизического моделирования в данном случае выбираются следующим образом: для передаточной характеристики (IdVd = 0) – минимальное напряжение на затворе Vgmin равно –6,5 B, максимальное напряжение на затворе Vgmax = 0,0 B, а напряжение на стоке Vd = 0,05 B, параметр Vg не используется; для выходной BAX (IdVd = 1) параметры Vgmax и Vgmin не используются, а Vd = 15 B, Vg = 0,0 B;

– при вариации по концентрации мышьяка в широкозонном материале: предполагаемые значения донорной примеси n_AlGaAs – $-2\cdot10^{17}$; $5\cdot10^{17}$ и $1\cdot10^{18}$ см⁻³, а постоянные значения мольной доли – x_AlGaAs = 0,3, толщина широкозонного слоя – h_AlGaAs = 0,05 мкм и длина затвора – Lg = 0,2 мкм;

параметры электрофизического моделирования в данном случае выбираются следующим образом: для передаточной характеристики (IdVd = 0) – минимальное напряжение на затворе Vgmin равно –5,0 B, максимальное напряжение на затворе Vgmax = 0,0 B, а напряжение на стоке Vd = 0,05 B, параметр Vg не используется; для выходной BAX (IdVd = 1) параметры Vgmax и Vgmin не используются, а Vd = 15 B, Vg = 0,0 B;

– при вариации по мольной доле алюминия: предполагаемые значения x_AlGaAs – 0,3; 0,4 и 0,5, а постоянные величины толщины широкозонного слоя – h_AlGaAs = 0,05 мкм, длина затвора – Lg = 0,2 мкм и концентрация доноров в широкозонном слое n_AlGaAs = $2 \cdot 10^{17}$ см⁻³;

параметры электрофизического моделирования в данном случае выбираются следующим образом: для передаточной характеристики (IdVd = 0) минимальное напряжение на затворе Vgmin равно -5,0 B, максимальное напряжение на затворе Vgmax = 0,0 B, а напряжение на стоке Vd = 0,05 B, параметр Vg не используется; для выходной BAX (IdVd = 1) параметры Vgmax и Vgmin не используются, а Vd = 15 B, Vg = 0,0 B.



Рис. 4.3. Смоделированные ВАХ НЕМТ:

а - передаточные; б - выходные

При этом параметры секции *CurrentPlot* командного файла *sde*vice_des.cmd должны быть заданы так:

CurrentPlot(Time=(Range=(0 0.3) Intervals=30 Range=(0.3 1.0) Intervals=20)) Общий характерный вид рассчитываемых ВАХ приведен на рис. 4.3.

4.4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Перенести в рабочую директорию проект с именем Lab_4a , который соответствует рассчитанной в лабораторной работе 3 структуре *p*–*n*-перехода (вариант *AA*). Добавить в его вычислительный поток два приложения *SDevice* с прикрепленными к ним командными файлами для расчета прямой и обратной ветвей ВАХ *p*-*n*-перехода. Готовые командные файлы следует взять из каталога *tmp_01*, убедиться при этом, что в рабочей папке проекта находиться файл *Diode_msh.tdr*, в котором содержатся результаты расчета *SSE*. Затем нужно произвести расчет входных и выходных ВАХ p-n-перехода, сформированного в конструкторе *SSE*, и сравнить полученные характеристики с прямой и обратной ветвями диффузионного диода, рассчитанными по технологии сквозного моделирования. Дома в отчете подробно откомментировать соответствующие структуры командных файлов *SDevice*, указав особо секцию, в которой задаются данные о диоде, сформированном в конструкторе *SSE*, а также секцию, в которой задаются напряжения на контактах структуры.

🗳 Приложения Переход Система 🎯 😭 🖬								user	🕬 🖉 🏟 Птн, 2	1 Май, 17:58 🗍
S /home/tcad hom										- 0 ×
Project Edit Scheduler View Scenario Tool R	arameter Experiments	s <u>N</u> odes '	Variables <u>O</u> p	timization Ca	libration Exte	ensions <u>H</u> elp)			
	enario: all	•	,	, 1 🗄 🗸	oo-∎[a	6 9	୍ଷ			2 1 6
Projects	Project Scheduler									
AnomeAcad_homeAcad10/DB ALab_Students Mork_Students BWork_Students BBork_Normov				Sentemasse	pl4 Sentaurus0	h Senaur sD	h Centaur sD	Sene IT ISD	No Variables	
Kurlenko		Dose	Time							
Leff 3aa	1		1						1	
b+⊖ 123	2	1.00e12	5							
⊟r⊡ Lab_4	3		10							
	4		1							
e pereher	5	1.00e13	5							
the min m2	6		10							
⊕tmp_03	7		1							
	8	1.00e14	5							
Lab_3aa	9		10							
ET Lab_4										
E Caten 01										
- 1 tmp_02										
(∰ tmp_03										

Рис. 4.4. Проект для моделирования диффузионного *p*–*n*-перехода с добавленными приложениями для расчета ВАХ диода, полученного в *SSE*



Рис. 4.5. ВАХ диода, полученного по технологии сквозного моделирования, и аналогичного диода, полученного в конструкторе SSE:

а – прямые ВАХ диодов; б – обратные ВАХ диодов

2. Приступить к выполнению части **B**. Для этого создать новый проект и с помощью MC перенести в его рабочую директорию подготовленную основу для моделирования HEMT в виде готовых командных файлов для SSE и SDevice из каталога tmp_02 . Затем необходимо сформировать в SWB план вычислительного эксперимента, определив имена конструктивно-технологических параметров структуры с селективным легированием и электрофизические параметры, аналогично приведенным на рис. 4.2. Потом, внимательно изучив особенности своего варианта расчета, описанные в разделе 4.3, заполнить данные плана вычислительного эксперимента, соответствующего вашему варианту задания, и запустить проект на расчет.

3. В ходе выполнения расчета проанализировать структуру командного файла для *SSE* и получить последовательность фрагментов, иллюстрирующую процесс конструирования *HEMT*, аналогичную приведенной на рис. 4.6.



Рис. 4.6. Последовательность фрагментов при конструировании НЕМТ:

а – основные слои заготовки для *НЕМТ*; б – области затвора (половинка) и стока;
 в – конструирование областей контактов; г – сетка и профили легирования,
 сконструированные для половинки *НЕМТ*

4. После завершения расчетов в оболочке SSE для всех трех вариантов структуры вывести в оболочке *Tecplot_SV* их графическое представление, в котором в области канала сделать одномерный разрез структуры, где следует показать изменения областей широкозонного и узкозонного полупроводников, гетероперехода и квантовой ямы в зависимости от варьируемого параметра.

5. Построить графики передаточных и выходных ВАХ транзистора (аналогичные рис. 4.3), оценить их чувствительность к варьируемому параметру, сделать выводы по форме получаемых ВАХ и найти напряжение отсечки. Дома откомментировать командные файлы для SSE (особо описав вид всех используемых концентрационных профилей) и SDevice с подробным описанием используемых физических моделей и алгоритмов изменения рабочих напряжений на контактах структуры.

6. Приступить к выполнению части *С*. Для этого в соответствии с указаниями преподавателя нужно перенести в рабочую директорию готовый проект *Lab_4c*, поясняющий принцип работы *HEMT* (рис. 4.7). Затем в оболочке *Inspect* построить графики передаточных ВАХ и найти напряжение отсечки.

S /home/tcad_home/tcad10/DB/Work_Students/Smirnov/123/Lab_4/example - SWB@ksref9.re							ref9.ref.n	ef.nstu.ru vC-2009.06)[@][×
Project Edit Scheduler View Scenario Tool	Parameter Experiments	<u>N</u> odes V	agiables <u>O</u> ptir	mization C	alibration E2	densions	<u>H</u> elp						
■ ■ ₽ ₽ ₽ × X № № ∽	Scenario: all	•		, ∎[≣×	≪ * ∎	š @	କ୍କ୍	8	7	7 411	¥ 🗐	2 1	0
Projects D	Project Scheduler	h_AlGaAs 0.05	Station SSB n_AlGaAs 1E18	Lg 0.2	X_AlGaAs 0.3		Vgn -5.	nin O	Vgmax 0.0	Vd 0.05	Vg 0.0	ldVd 0	

Рис. 4.7. Вычислительный план проекта для иллюстрации принципа действия *HEMT*

7. В зависимости от напряжения на затворе построить графики изменения электрического потенциала в одномерном сечении квантовой ямы, а также графики изменения концентрации электронов в канале *HEMT*.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. С помощью зонной диаграммы поясните принцип действия *HEMT*.

2. Какой конструктивный элемент в структуре *HEMT* называется спейсером, для чего он предназначен и можно ли его показать в исследуемом в лабораторной работе приборе?

3. Покажите на рис. 4.6, *г* области расположения электродов истока, стока, затвора и подложки и поясните, на основе анализа командного файла, какие краевые условия для потенциала на них задаются.

4. Поясните, какие области в исследуемой *HEMT*-структуре однородно легированы, а какие – нет. Каким образом в них задаются концентрационные профили легирующих примесей?

5. Каким образом в плане вычислительного эксперимента задается расчет передаточных и выходных ВАХ? Укажите номера узлов, им соответствующие.

6. Как величина варьируемого параметра в вашем варианте влияет на напряжение отсечки *HEMT*?

7. Поясните, каким образом в визуализаторе *Tecplot_SV* можно построить одномерные графики зонной структуры гетероперехода и показать влияние на нее каких-либо факторов, исследуемых в лабораторной работе.

8. Какой тип модели переноса электронов в канале *HEMT* используется в приложении *SDevice* и соответствует ли он модели на основе ФСУ?

9. Каким образом после завершения расчета приложения SSE можно посмотреть получающуюся расчетную сетку?

10. Поясните, каким образом после завершения всех расчетов можно графически оценить геометрическую толщину квантовой ямы при нулевом напряжении на затворе.

11. Перечислите, какие физические модели процессов генерациирекомбинации носителей заряда используются при расчете ВАХ *HEMT*.

12. Относится ли применяемая в лабораторной работе вычислительная технология к технологии сквозного моделирования? (Ответ обосновать.)

13. Перечислите, какие физические модели подвижности электронов используются при расчете ВАХ *НЕМТ*.

14. На каких электродах структуры *HEMT* задаются омические граничные условия для потенциала, а на каких – иные (если таковые имеются)?

15. Какие транзисторы были изготовлены раньше – *HEMT* или *n*-МОПТ на напряженном кремнии и почему?

16. Какой физический эффект связан с командой EffectiveIntrinsic-Density (NoBandGapNarrowing) для приложения Sdevice?

17. Каким образом задаются строки-комментарии в командных файлах SSE и SDevice?

18. Какой вычислительный процесс в *SDevice* управляется с помощью параметра *Iterations* в секции *Math* командного файла?

19. Какой вычислительный процесс описывается в SDevice с помощью команды Coupled (Iterations = 100) { Poisson } в секции Solve?

20. В чем состоит смысл понятия «Ньютоновская итерация» и в каком месте командного файла для *SDevice* оно используется?

21. Какой физический смысл имеет команда *Hydrodynamic (eTemperature)*, в каком приложении и в какой секции она используется?

22. Сколько расчетных точек ВАХ в передаточной характеристике *HEMT* в среднем использовалось в лабораторной работе и каким образом можно визуализировать 2*D* распределения плотности электронов по структуре, соответствующие каждой такой точке в отдельности?

23. Поясните методику расчета в одном проекте части *A* прямых ВАХ диодов, структуры которых были смоделированы в *SProcess* и в *SSE*.

24. Поясните, какие физические эффекты моделируются с помощью команды *Mobility* (*DopingDep HighFieldSat Enormal*).

25. Какой физический смысл имеет параметр Material в команде Physics (Material = "GaAs") { Mobility (Dopingdependence) } для приложения Sdevice?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Стремительное развитие нанотехнологий и полупроводниковой наноэлектроники, свидетелями которого мы сейчас все являемся, порождает надежду на быстрое техническое воплощение в жизнь очень многих фантастических проектов, которые пока еще только обсуждаются на научных конференциях. Нечто подобное происходило в 20 веке с проектами, описанными в романах Ж. Верна. Несомненно также то, что все эти новые технические устройства и технологии, существующие в основном на бумаге или даже в головах исследователей, будут использовать ИМС, разработанные на новой элементной базе, параметры и характеристики которой окажутся предельно приближены к свойствам атомов, созданных Природой. Поэтому во всем мире в области электроники инженеры из различных научных университетских лабораторий и исследовательских центров всех известных полупроводниковых компаний ведут интенсивный поиск тех наноэлементов, которые станут основой элементной базы для ИМС 21 века [17, 20].

В настоящее время многочисленные научные журналы по электронике, труды конференций, Internet заполнены различными информационными сообщениями о тех или иных достижениях. В этом океане фактов и информационном лабиринте молодому исследователю важно иметь какой-то инструмент для быстрого анализа таких данных (или, иными словами, твердую почву под ногами). Современные *TCAD* системы моделирования, позволяющие точно рассчитывать конкретные численные параметры и характеристики новых наноэлементов, и являются, по сути, таким средством.

В процессе своего исторического развития *TCAD*-системы прошли значительный путь [8, 9, 13–15, 21–27, 31]. И многие из них, такие как легендарные *SUPREM-IV* и *PISCES-II* [26], несмотря на высочайший научно-технический уровень, в них заключенный, остались уже далеко позади. Новые поколения *TCAD*-систем, и прежде всего системы, разрабатываемые компанией SYNOPSYS [1,10, 13], значительно превосходят все предыдущие разработки по сложности используемых физических моделей, конструктивной геометрии прибора, численным методам, применяемым для построения расчетных сеток и решения возникающих при этом систем линейных уравнений [15, 16].

В информационном смысле *TCAD*-системы, особенно для российских пользователей, являются довольно сложным объектом, видимо превосходящем все известные прикладные системы такого рода. Квалификационные требования к практическим пользователям этих систем очень велики. Причем решающим обстоятельством успешного применения *TCAD* является не «искусство нажимания на кнопки компьютера», а системный анализ полученных численных результатов на основе заложенных в систему моделей и численных алгоритмов. Нужно постоянно иметь в виду, что ответственность за полученные результаты моделирования несет не компьютер, а человек. И здесь уместно напомнить, что во все времена главным качеством Инженера является его умение думать.

Описанные выше обстоятельства и являются настоятельной причиной того, чтобы российские студенты и аспиранты, связанные с полупроводниковой электроникой, имели возможность получить доступ к русскоязычным учебным материалам, вводящих их в круг вопросов, связанных с использованием *TCAD*-системы *Sentaurus*. За последнее пятилетие такие материалы стали появляться в ведущих российских технических университетах [12, 28–31] и прежде всего в МИЭТе [10]. Авторы данного руководства надеются, что их труд будет также полезен в этом смысле.

В завершение авторы считают своим долгом выразить благодарность бывшим выпускникам РЭФ НГТУ, ныне работающим в компании SYNOPSYS, В.А. Морозу и О.Ю. Пензину за постоянное внимание к данному практикуму. Также мы благодарны студентам 3 курса РЭФ А.В. Егоркину и И.А. Смирнову за их молодой энтузиазм, проявившийся в отладке некоторых командных файлов.

ЛИТЕРАТУРА

Основная

1. <u>www.synopsys.com</u>

2. Драгунов В.П., Неизвестный И.Г. Наноструктуры. Физика, технология, применение. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. – 356 с

3. Wong B.P., Zach F., Moroz V., Mittal A., Starr G.W. Nano-CMOS design for manufacturability. – Wiley, 2009. – 383 pp.

4. Мартинес-Дуарт Д.М., Мартин-Палма Р.Д., Агулло-Руеда Ф. Нанотехнологии для микро- и оптоэлектроники. – М.: Техносфера, 2009. – 367с.

5. Игнатов А.Н., Калинин С.В. и др. Микросхемотехника и наноэлектроника, ч. 2.– Новосибирск, СибГУТИ, 2007. – 243 с.

6. *Шур М*. Современные приборы на основе арсенида галлия: пер. с англ. – М.: Мир, 1991. – 632 с.

7. Бубенников А.Н. Моделирование интегральных микротехнологий, приборов и схем. – М.: Высшая школа, 1989. – 320 с.

8. МОП-СБИС. Моделирование элементов и технологических процессов / Под ред. П. Антонетти, Д. Антониадиса, Р. Даттона, У. Оулдхема. – М.: Радио и связь, 1988. – 496 с.

9. Selberherr S. Analysis and simulation of semiconductor devices. – Wien., Springer, 1984. – 294 pp.

10. Королев М.А., Крупкина Т.Ю., Ревелева М.А. Технология, конструкции и методы моделирования кремниевых интегральных микросхем. В 2 ч. – М.: Бином, 2007. – 397 с.

11. Абрамов И.И. Лекции по моделированию элементов интегральных схем. – РХД, М. – Ижевск, 2005.

12. Макаров Е.А., Мясников А.М. Приборно-технологическое моделирование с помощью пакета Sentaurus TCAD: Методическое пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2008. – 150 с.

Дополнительная

13. *Тихомиров П., Пфеффли П., Зорзи М.* Система Sentaurus TCAD компании Synopsys // Электроника: НТБ. – 2006. – № 7. – С. 89–95.

14. Bork I., Moroz V., Bomholt L., Pramanik D. Trends, demands and challenges in TCAD. – Materials science and engineering B 124–125, 2005, pp. 81–85.

15. <u>www.essderc.org</u> (Труды ежегодной конференции по TCADмоделированию). 16. TCAD news. – http://www.synopsys.com/products/tcad/ tcad_ pubs.html

17. <u>http://www.itrs.net/reports.html.</u>

18. Моделирование полупроводниковых приборов и технологических процессов / Под ред. Г.В. Гадияка. – М.: Радио и связь, 1989.

19. *Кальфа А.А.* Полевые транзисторы на гетероструктурах с селективным легированием. Современное состояние и перспективы развития. – Электронная техника, сер. Электроника СВЧ, вып. 9(403), 1987, стр. 35–49.

20. Service R. F. Is silicon's reign nearing its end? – Science, v=323, 20 Feb. 2009, pp. 1000–1002.

21. *Plummer J.D., Deal M.D., Griffin P.B.* Silicon VLSI Technology: fundamentals, practice and modeling. – Prentice Hall, 2001.

22. Engl W.L. (Ed.) Process and device modeling. – North-Holland, Elsevier, 1986.

23. *Cham K.M., Oh S.Y., Chin D., Moll J.L.* Computer-Aided Design and VLSI device development. – Boston: Kluwer, 1986. – 317 pp.

24. Dutton R.W. Modeling of the silicon integrated circuit design and manufacturing process. – IEEE Trans., v=ED-30, № 9, pp. 968–986.

25. Энгль В.Л., Диркс Х.К., Майнерцхаген Б. Моделирование полупроводниковых приборов // ТИИЭР, 1983, т. 71. – № 1. – С. 14–42.

26. Даттон Р.У., Пинто М.Р. Средства автоматизации и прогресс интегральных технологии // ТИИЭР, 1986, т.74. – № 12. – С. 150–161.

27. *Бубенников А.Н., Садовников А.Д.* Физико-технологическое моделирование субмикронных элементов кремниевых ССБИС // Зарубежная электронная техника, 1987. – № 3. – С. 3–21; № 4. – С. 3–28.

28. *Лукичев В.Ф., Хренов Г.Ю.* Математические модели технологических процессов электронной техники. – М.: МИРЭА, 2006.

29. Горячкин Ю. В. Физико-топологическое моделирование в САПР ТСАD. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2006.– 124 с.

30. Шишлянников Б.М. ISE TCAD: Программа моделирования технологических процессов микроэлектроники: методические указания. – Новгород: НовГУ им. Ярослава Мудрого, 2004. – 630 с.

31. Асессоров В.В., Быкадорова Г.В., Ткачев А.Ю. Моделирование полевых полупроводниковых приборов в САПР ISE TCAD. – Воронеж: ВГУ, 2007.

32. Armstrong G.A., Maiti C.K. Technology computer aided besign for Si, SiGe, GaAs integrated circuits. – The institution of Engineering and Technology, UK, 2007.

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАНОТРАНЗИСТОРОВ В TCAD SENTAURUS

Методическое руководство

Редактор И.Л. Кескевич Выпускающий редактор И.П. Брованова Корректор И.Е. Семенова Компьютерная верстка Л.А. Веселовская

Подписано в печать 05.10.2010. Формат 60 × 84 1/16. Бумага офсетная. Тираж 150 экз. Уч.-изд. л. 6,04. Печ. л. 6,5. Изд. № 187. Заказ № Цена договорная

Отпечатано в типографии Новосибирского государственного технического университета 630092, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20