А.В. Арсентьев Е.Ю. Плотникова

МЕТОДЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ:

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

Учебное пособие



Воронеж 2016

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

А.В. Арсентьев Е.Ю. Плотникова

МЕТОДЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ:

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

Утверждено Редакционно-издательским советом университета в качестве учебного пособия

Воронеж 2016

УДК 4.14.23, 550.34.013.4

Арсентьев А.В. Методы математического моделирования: лабораторный практикум: учеб. пособие [Электронный ресурс]. – Электрон. текстовые и граф. данные (2,3 Мб) / А.В. Арсентьев, Е.Ю. Плотникова. – Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2016. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM): цв. – Систем. требования : ПК 500 МГц и выше; 256 Мб ОЗУ; Windows XP; SVGA с разрешением 1024х768; Adobe Acrobat; CD-ROM дисковод; мышь. – Загл. с экрана.

В учебном пособии представлены материалы по методам математического моделирования технологических процессов микрои наноэлектронного производства в системе автоматизированного проектирования Silvaco TCAD. Приведены справочные материалы по методам моделирования технологических операций и задания для лабораторных работ.

Излание соответствует требованиям Федерального государственного образовательного стандарта высшего образования «Электроника направлению 11.04.04 И наноэлектроника» ПО (направленность «Приборы И устройства в микро-И «Метолы наноэлектронике»), дисциплине математического моделирования».

> Ил. 12. Табл. 7. Библиогр.: 6 назв. Научный редактор д-р физ.-мат. наук, проф. С.И. Рембеза

- Рецензенты: кафедра физики полупроводников и микроэлектроники Воронежского государственного университета (зав. кафедрой д-р физ.-мат. наук, проф. Е.Н. Бормонтов); д-р техн. наук, проф. А.В. Строгонов
 - © Арсентьев А.В., Плотникова Е.Ю., 2016
 - © Оформление. ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2016

ВВЕДЕНИЕ. СИНТАКСИС РЕДАКТОРА АТLAS

Командный файл редактора Atlas представляет собой список команд, которые адресуются редактору для обработки и выполнения. Список выглядит как текст из ASCII символов, который может быть сгенерирован в модуле DeckBuild или любом другом текстовом редакторе. Разработка загрузочного файла в DeckBuild является предпочтительной, поскольку там можно использовать меню команд и интерактивную форму работы.

1. ОПЕРАТОРЫ И ПАРАМЕТРЫ

Загружаемый файл всегда строится по определенному шаблону с использованием операторов. Каждый оператор состоит из слова-ключа, который определяет этот оператор, и описания его настроек. Классическая форма записи:

<STATEMENT> <PARAMETER>=<VALUE>

В большинстве случаев синтаксис входных команд не чувствителен к регистру. Чувствительность возникает тогда, когда команды EXTRACT, SET, GO и SYSTEM выполняются непосредственно в DeckBuild (не передаваясь для моделирования в Atlas). Также к регистру чувствительно имя создаваемого и расчетных файлов при работе под Unix.

Для любого оператора <STATEMENT> в его значении <VALUE> Atlas может использовать 4 типа данных: Real, Integer, Character и Logical. Например, задан код:

DOPING UNIFORM N.TYPE CONCENTRATION=1.0e16 REGION=1 OUTFILE=my.dop

Здесь оператором служит слово DOPING (легирование). Все остальные определения являются параметрами легирования. UNIFORM и N.TYPE – параметры логического типа, если они записаны в коде оператора, то они выполняются (значение – истина); если какой-то параметр в коде не задан, то его значение будет использовано так, как прописано в TCAD по умолчанию (обычно параметр отключен). Параметр CONCENTRATION имеет тип Real и в качестве исходного значения использует дробные числа. REGION имеет тип Integer и может быть задан только целым числом. OUTFILE – символьный тип.

Оператор всегда ставится на первое место, а порядок расположения его параметров не критичен. Для задания параметра требуется использовать достаточное количество символов, чтобы отличать его от остальных параметров. Так, CONCENTRATION можно сократить до CONC.

Если возникает необходимость явно прописать логический параметр в false, перед ним ставится знак ^.

Если в начале строки стоит знак *#*, строка станет строкой комментария и будет игнорироваться программой.

В одной строке редактора Atlas можно записать 256 символов. Для удобства работы длинные строки рекомендуется разбивать на несколько строк символом \, который ставится в конце строки перед ее переносом на следующую.

Список команд Atlas

Порядок, в котором операторы определяются во входном файле Atlas, играет важную роль. Операторы делятся на 5 групп, которые быть правильной должны заданы В последовательности. Если порядок нарушен, при моделировании возникнет окно сообщения, говорящее 0 неверно заданной операции или обрыве программы. Например, если параметры материала или модели заданы в неверном порядке, они могут быть не задействованы при расчете.

Порядок операторов начинается с задания сетки прибора, затем идет описание его структуры, далее приводится блок расчетов.

Таблица 1

Порядок задания параметров структуры прибора в каждой группе

Группа параметров	Операторы
Задание структуры	MESH
	REGION
	ELECTRODE
	DOPING
Выбор материала и моделей расчета	MATEROAL
	MODLES
	CONTACT
	INTERFACE
Выбор численного метода	METHOD
Настройка расчетов	LOG
	SOLVE
	LOAD
	SAVE
Анализ результатов моделирования	EXTRACT
	TONYPLOT

2. ЗАДАНИЕ СТРУКТУРЫ ПРИБОРА

В модуле Atlas существуют 3 метода задания структуры прибора.

Во-первых, считать существующую структуру из файла. В этом случае структура была создана ранее в модулях Atlas, Athena или DevEdit. Команда MESH загружает настройки сетки, геометрические размеры прибора, расположение электродов и профили легирования. Например:

MESH INFILE=<filename>

Во-вторых, использовать автоматическое преобразование из DeckBuild структуры, созданной в Athena или DevEdit.

В третьих, создать структуру используя язык программирования модуля Atlas.

2.1. Использование команд Athena

Если модули Athena или Atlas были запущены из текстового редактора DeckBuild, можно использовать их автоматическое взаимодействие. Рассмотрим полный набор этапов загрузки настроек сетки, размеров и профилей распределения примеси в структуре из редактора Athena в Atlas.

1. Нанесение материала и формирование в нем электродов в редакторе Athena.

2. Использование команды ELECTRODE в редакторе Athena для определения места расположения контактов. Здесь задаются координаты по осям X и Y как пересечения в заданной области. Вся область обозначается как электрод. В большинстве случаев требуется задать только координаты по оси X:

ELECTRODE NAME=gate X=1.3 [Y=-0.1])

Если контактом будет служить вся нижняя часть структуры, можно использовать команду:

ELECTRODE NAME=substrate BACKSIDE

3. Сохранение файла структуры при работающем модуле Athena:

STRUCTURE OUTF=nmos.str

Запуск Atlas командой go atlas, записанной как 4 строка кода во входном файле структуры. Таким образом происходит наиболее распространенная автоматическая передача структуры из Athena в Atlas. Если возникла необходимость загрузки параметров прибора Atlas без В передачи всей информации, автоматической используется команла MESH:

MESH INF=nmos.str

Atlas унаследует параметры сетки, используемые ранее в Athena. Если предварительная настройка сетки была сделана качественно или с использованием нестандартных возможностей редактора Athena, в модуле Atlas этим методом можно получить хорошие результаты моделирования. В

некоторых случаях настройки сетки, используемые при моделировании процессов изготовления прибора, не могут быть использованы при моделировании его работы. Тогда для перенастройки сетки можно использовать модуль DevEdit или задействовать команду REGRID.

Необходимо отметить, что при автоматической передаче файла из Athena в Atlas настраивать MESH не требуется.

2.2. Использование команд DevEdit

Для того, чтобы подключить созданную в модуле DevEdit 2D или 3D структуру в Atlas, используется команда:

MESH INF=<structure filename>

Команда загружает настройки сетки, геометрические размеры прибора, расположение электродов и профили легирования. Atlas автоматически определяет, относится ли сетка к двумерным модулям S-PISCES или Blaze, или к трехмерным модулям Device 3D или Blaze3D.

Если загружаемая из DevEdit структура изначально была создана в Athena, электроды подгружаются по принципу, показанному выше. Если структура была создана в DevEdit, области электродов будут определяться с помощью меню Region/Add region редактора DevEdit.

2.3. Использование языка для задания структуры

Для того, чтобы в редакторе Atlas создать структуру, первым этапом требуется определить настройки сетки. Сетка покрывает всю физическую область моделирования. Она определяется как набор горизонтальных и вертикальных линий, пересекающихся друг с другом. Покрытые сеткой области соотносятся с различными материалами, из которых формируется прибор. Например, классический МОП транзистор состоит из областей кремния и окисла. После того, как области

были определены, задается расположение электродов. На последнем этапе определяется степень легирования каждой области.

При формировании листинга структуры приведенные здесь этапы должны обязательно присутствовать.

2.3.1. Определение начальных настроек сетки прибора

Первая команда моделирования структуры выглядит следующим образом:

MESH SPACE.MULT=<VALUE>

Далее записываются наборы настроек сетки по осям X и Y (X.MESH и Y.MESH):

X.MESH LOCATION=<VALUE> SPACING=<VALUE>

Y.MESH LOCATION=<VALUE> SPACING=<VALUE>

SPACE.MULT Параметр используется для масштабирования сетки, заданной с помощью команд X.MESH и Y.MESH. По умолчанию он равен 1. Если задать значения больше 1, вся сетка станет более грубой, что даст более быстрое моделирование. Значения меньше 1 изменяют все настройки сетки на более мелкие, что повышает точность моделирования. Значения X.MESH и Y.MESH используются также для задания (в мкм) координат вертикальных и горизонтальных линий структуры (LOCATION). В начале моделирования можно задать только 2 линии сетки по каждой оси. Atlas автоматически добавит новые линии, которые будут использоваться для постепенного перехода между разными настройками сетки структуры. Значения переменных X.MESH и Y.MESH должны записываться в порядке роста значений по осям Х и У (как положительные, так и отрицательные).

На рисунке показан принцип работы масштабирования сетки. На левом изображении демонстрируется изменение

вертикальных линий сетки с 1 мкм при X=0 до 0.5 мкм при X=5 мкм. На правом рисунке показано уменьшение параметра SPACE.MULT в 2 раза (SPACE.MULT=0.5), которое увеличивает плотность сетки в обоих направлениях.

В настройках сетки можно использовать команду PERIODIC, которая задает периодичность структуры и линий сетки по оси Х.



Рис. 1. Настройка масштаба сетки

После задания основной сетки структуры в выбранных областях можно удалить линии сетки. Обычно этот прием используется в тех областях, где можно использовать очень крупную сетку, например в объеме подложки. Для удаления сетки используется команда ELIMINATE, которая удаляет каждую вторую линию сетки в выбранном направлении в заданной области:

ELIMINATE COLUMNS X.MIN=0 X.MAX=4 Y.MIN=0.0 Y.MAX=3

Команда удаляет каждую вторую вертикальную линию сетки в прямоугольной области в границах x=0, x=4, y=0 и y=3 мкм.

2.3.2. Задание областей и материалов

После того, как все настройки сетки были проведен, каждой из сформированных областей необходимо назначить материал. Это действие выполняется с помощью команды REGION:

REGION number=<integer> <material_type> <position parameters>

Номер области должен начинаться с 1. В Atlas можно задавать до 15000 различных областей. Библиотека редактора содержит большое число материалов. Если используется композитный (многослойный) материал, в параметре REGION требуется задать X и Y координаты каждой части.

Расположение задается в мкм с использованием параметров Х.МІN, Х.МАХ, Ү.МІN и Ү.МАХ. Если расположение новой области перекрывается с ранее заданным, область перекрытия будет восприниматься как область нового материала.

Необходимо следить за тем, чтобы все координаты материалов соответствовали настройкам сетки структуры, иначе появится ошибка, и моделирование не будет выполнено.

В настройках MATERIAL можно устанавливать свойства материалов выбранных областей. Но перед этим необходимо полностью построить сетки моделирования и задать настройки легирования.

2.3.3. Работа в цилиндрических координатах

При моделировании дискретных силовых приборов часто используются цилиндрические координаты. В этом режиме X=0 это ось симметрии, вокруг которой будет строиться цилиндрическая структура. При работе в цилиндрических координатах многие значения, установленные по умолчанию, меняются. Рассчитанный ток выводится в А, тогда как обычно в

А/мкм; аналогично и другие единицы измерения(Ф вместо Ф/мкм для конденсаторов).

Для задания цилиндрической симметрии используются настройки оператора MESH:

MESH NX=20 NY=20 CYLINDRICAL

Здесь по оси X будут расположены 20 узлов сетки, так же как и по оси Y.

Команда для импорта сетки с цилиндрической симметрией:

MESH INF=mesh0.str CYLINDRICAL

Необходимо отметить, что параметр CYLINDRICAL не сохраняется в файле настройки сетки, следовательно, должен задаваться каждый раз при загрузке файла с цилиндрической симметрией.

2.3.4. Задание электродов

После того, как были заданы области и материалы структуры, проводится подключение электрода для контакта к полупроводниковому материалу. Оно выполняется командой ELECTRODE:

ELECTRODE NAME=<electrode name>

В одной программе можно задавать до 50 электродов. Настройки расположения задаются в мкм с помощью команд X.MIN, X.MAX, Y.MIN и Y.MAX. Несколько электродов могут иметь одно и то же имя. Узлы, имена контактов которых идентичны, будут электрически соединены.

Для задания места расположения электрода можно использовать ключевые слова. Если при описании электрода не была задана координата по оси Y, он будет расположен на верху структуры. Также можно использовать команды RIGHT, LEFT, TOP и BOTTOM для описания расположения электрода:

ELECTRODE NAME=SOURCE LEFT LENGTH=0.5

Этот код определяет настройки электрода истока, который начинается в верхнем левом углу структуры и распространяется вправо на расстояние LENGTH.

2.3.5. Задание профиля легирования областей

Atlas позволяет задавать аналитический профиль распределения легирующей примеси или использовать информацию по легированию областей из смежных модулей или экспериментальных данных. Степень легирования задается командой DOPING:

DOPING <distribution_type> <dopant_type>

2.3.6. Аналитические профили легирования

Аналитические профили распределения примеси в САПР TCAD представлены равномерным распределением, распределением по Гауссу и распределением по дополнительной функции ошибок. Настройка параметров распределения задается в разделе DOPING. На рисунке показано комбинированное распределение с использованием равномерного и по Гауссу:

DOPING UNIFORM CONCENTRATION=1E16 N.TYPE REGION=1

DOPING GAUSSIAN CONCENTRATION=1E18 CHARACTERISTIC=0.05 P.TYPE X.LEFT=0.0 X.RIGHT=1.0 PEAK=0.1

Первая настройка DOPING задает равномерное распределение примеси п-типа в концентрации 10¹⁶ см⁻³ в области, обозначенной как region 1 (вместо номера области можно задать координаты на осях X и Y).

Вторая настройка DOPING определяет область р-типа с Гауссовым профилем распределения (максимальная концентрация 10¹⁸ см⁻³). Также здесь задано расположение пика

легирования по линии от x=0 до x=1 мкм. перпендикулярно этой линии профиль распределения будет снижаться по Гауссу со стандартным отклонением $0.05/\sqrt{2}$ мкм. В областях при x < 0 и x > 1 концентрация снижается по закону $(70/\sqrt{2})\%$ от CHARACTERISTIC. Этот боковой спад может быть настроен с помощью параметра RATIO.LATERAL.

Если распределение по Гауссу добавить в область, легирование которой было проведено примесью противоположного типа, для задания глубины p-n перехода можно использовать параметр JUNCTION вместо того, чтобы задавать стандартное распределение с помощью параметра СНАRACTERISTIC.



Рис. 2. Профиль распределения легирующей примеси

Еще один доступный аналитический профиль распределения - по дополнительной функции ошибок. Он задается как

$$erfc(z) = -\frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{z}^{\infty} \exp(-y^2) \, dy$$

где *z* – расстояние, определенное как переменная типа CHAR.

Аналитическое распределение DOPING может быть представлено как:

DOPING ERFC N.TYPE PEAK=0.5 JUNCTION=1.0 CONC=1.0E19 X.MIN=0.25 X.MAX=0.75 RATIO.LAT=0.3 ERFC.LAT

DOPING P.TYPE CONC=1E18 UNIFORM

Такая настройка задает распределение донорной примеси с максимальной концентрацией 10^{19} см⁻³ в точке X=0.5 мкм.

Параметр типа CHAR, который определяет степень изменения уровня легирования вглубь структуры, напрямую в DOPING не задается. Он рассчитывается как величина полной концентрации примеси в нулевой точке, заданной в JUNCTION. В коде, приведенном здесь, концентрация акцепторов равна 10^{18} см⁻³ по всей заданной области, а концентрация доноров равна 10^{18} см⁻³ в точке 1 мкм, в которой создается р-п переход. Значение CHAR рассчитывается из формулы

$$erfc\left(\frac{JUNCTION-PEAK}{CHAR}\right) = 0.1.$$

Отсюда CHAR примерно равен 0.43 мкм.

Кроме того, концентрация доноров снижается в поперечном направлении от 0.25 до 0.75 мкм. Это снижение в 0.3 раза отличается от классического и задает рельеф дополнительной функции ошибок.

2.3.7. Импорт профилей легирования из 1D SSUPREM3

Одномерные профили распределения можно вносить в Atlas из сторонних файлов SSUPREM3. Структура генерируемого файла при завершении моделирования в SSUPREM3 имеет вид:

STRUCTURE OUTFILE=<output filename>

Тогда в Atlas настройка DOPING MASTER будет считывать созданный файл. Поскольку обычно сгенерированный файл SSUPREM3 содержит информацию о всех распределениях примесей по структуре, необходимо указать, какая примесь используется далее:

DOPING MASTER INFILE=mydata.dat BORON REGION=1

Здесь распределение бора берется из файла mydata.dat, оно импортируется и применяется к области №1. Профили распределения из SSUPREM3 в Atlas импортируются по одному:

DOPING MASTER INFILE=mydata.dat BORON OUTFILE=doping.dat

DOPING MASTER INFILE=mydata.dat ARSENIC X.RIGHT=0.8 RATIO=0.75

DOPING MASTER INFILE=mydata.dat ARSENIC X.LEFT=2.2 RATIO=0.75

Здесь сначала создается распределение бора из файла doping.dat, по которому проводится легирование мышьяка в заданных областях для создания двумерной структуры.

Рекомендуется подключать OUTFILE при первом легировании для создания 2D и 3D структур. Далее этот файл будет использоваться для интерполяции легирования на пересчитанную сетку после команды REGRID. Однако, этот файл в TonyPlot не построится. Настройки расположения и параметр RATIO.LATERAL используются аналогично для

аналитических профилей распределения в одномерной структуре.

2.4. Автоматическая настройка сетки (Automeshing)

Автоматическая настройка сетки – один из простых методов задания размеров структуры и линий сетки. Она хорошо зарекомендовала себя в эпитаксиальных структурах, особенно если в них создается большое количество слоев (например, лазер поверхностного излучения с вертикальным объёмным резонатором / VCSEL). Автонастройка сетки формирует плавные переходы на углах структуры с помощью задания координаты Y в настройках REGION.

2.4.1. Задание сетки и областей

В данном примере демонстрируются основные элементы автонастройки сетки на простом приборе:

MESH AUTO

X.MESH LOCATION=-1.0 SPACING=0.1

X.MESH LOCATION=1.0 SPACING=0.1

Основные настройки аналогичны стандартным, однако есть 2 ключевых элемента. Во-первых, в настройки команды MESH включен параметр AUTO (он требуется для запуска автонастройки сетки). Во-вторых, что более важно, в примере не задаются координаты структуры по оси Y (так как расположение линий сетки по оси Y будет автоматически задаваться параметрами настройки REGION).

Если все таки задать одну или несколько настроек сетки в Y.MESH, они будут включены в настройки сетки.

Расширенные настройки автомасштабирования сетки показаны ниже. С помощью следующих четырех строк кода можно задавать области прибора:

```
REGION TOP THICKNESS=0.02 MATERIAL=GaN NY=5
DONOR=1E16
REGION BOTTOM THICKNESS=0.1 MATERIAL=AlGaN
NY=5 DONOR=1E17
X.COMP=0.2
REGION TOP THICKNESS=0.08 MATERIAL=AlGaN
NY=4 ACCEPTOR=1E17
X.COMP=0.2
REGION BOTTOM THICKNESS=0.5 MATERIAL=AlGaN
NY=10 DONOR=1E18
X.COMP=0.2
```

2.4.2. Новые подходы к работе в ТСАД

Во-первых, известно, что состав и степень легирования задаются в параметре REGION, который позволяет определять настройки DONOR, ACCEPTOR, X.COMPOSITION и Y.COMPOSITION, с помощью которых можно задавать равномерное распределение, состав вместе или по отдельности для каждого заданного региона.

Также необходимо задавать несколько дополнительных параметров - ТОР, ВОТТОМ, THICKNESS и NY. Они используются для задания примерных областей и толщины слоев в виде параметров сетки по оси Y. Самым простым из этих параметров является толщина области THICKNESS, задаваемая по оси Y в мкм для каждого слоя. По оси X ограничения (X.MIN или X.MAX) не задаются, поскольку подразумевается, что слой расположен по всей заданной поверхности (описывается в настройках X.MESH).

Параметр NY определяет, сколько линий сетки по оси Y находятся в пределах области. Вместо параметра NY можно использовать параметр SY – он позволяет задавать (мкм) расстояние между линиями сетки по оси Y в заданной области. Необходимо помнить, что величина параметра SY не может

быть больше величины параметра THICKNESS. Соотношение между параметрам SY, NY и THICKNESS можно записать как SY = THICKNESS/NY.

На рисунке показано, как влияет изменение параметров ТОР и ВОТТОМ на изменение сетки структуры.



Рис. 3. Настройки сетки с помощью различных параметров

На рисунке приводится изменение сетки структуры и размеров областей при изменении настроек REGION. Видно, что область можно расположить вверху и внизу структуры, прописывая в коде расположения команды ТОР и ВОТТОМ. Такой подход позволяет упростить построение структуры в редакторе Atlas, в котором положительные значения по оси Y

откладываются вниз. Аналогично командами ТОР и ВОТТОМ можно задавать расположение ELECTRODE.

На рисунке можно заметить, что не все линии сетки по оси У в заданных областях совпадают с заданным в коде значением. Это происходит из-за того, что на границах между областями масштаб сетки по оси У задан неоднозначно и, как следствие. алгоритм автонастройки выполнен сетки. устанавливающий меньшее значение сетки в заланных границах.

Алгоритм автонастройки сетки использует определение различных расположений по оси Y «вверху» и «внизу» области – эти области можно назвать «Ytop» и «Ybottom». До того, как будут определены настройки REGION, «Ytop» и «Ybottom» будут установлены в «0». Во время настройки REGION может быть выполнен один из алгоритмов:

- Если область размещается вверху структуры с помощью параметра ТОР, область будет отсчитываться от «Ytop» до значения «Ytop»-THICKNESS (необходимо учитывать, что положительные значения откладываются вниз), а значение «Ytop» сместится на новую позицию «Ytop»-THICKNESS.

- Если новая область будет располагаться внизу (параметр BOTTOM), ее расположение будет отсчитываться от «Ybottom» в сторону «Ybottom»+THICKNESS, а значение «Ybottom» сместится в точку «Ybottom»+THICKNESS.

Алгоритм автонастройки сетки гарантирует прекрасное соотношение всех областей и отсутствие несоответствий при расположении областей на сетке по оси Y.

2.4.3. Неравномерная настройка координат сетки по оси X и автомасштабирование сетки

В некоторых случаях структуру можно задавать с использованием разрывов областей по оси Х. С помощью

разрывов материала можно задать вытравленные мезаструктуры или отверстия в окисле.

Автонастройка сетки в таком случае задается двумя методами. Например, требуется вытравить область справа от X=0 и вверх от Y=0 в структуре, показанной в разделе 2.4.2. В этом случае в код добавляется команда

REGION MATERIAL=Air X.MIN=0.0 Y.MAX=0.0

В данном случае автонастройка сетки не используется, область удаляется стандартными методами (см. paнee). В редакторе Atlas можно смешивать стандартный синтаксис и автонастройку сетки. На рисунке показана структура и настройка сетки с использованием частичной автонастройки.



Рис. 4. Автонастройка сетки

Сложностью задания смешанного режима является то, что при использовании абсолютных координат по оси У при выборе определенной координаты, например, сложением толщин, можно не попасть в автоматически рассчитанные результате структура координаты. В может получить конфигурацию, отличную от планируемой. Кроме этого,

построение сетки координат может стать очень сложным из-за слишком близкого расположения линий по оси Y друг к другу. В результате получится плохая сходимость расчетов, и используемая модель не будет прорабатываться.

Однако в некоторых случаях можно абсолютно точно предсказать расположение углов и линий сетки по оси Y. Настройка абсолютного значения измерения по оси Y в структуре прибора должна лежать в нуле.

Этот же принцип относится к размещению заглубленных электродов – при автоматическом размещении сетки они должны располагаться на Y=0.

Для того, чтобы обеспечить высокую сходимость сетки материала на плоскости X, можно использовать параметр STAY вместе с параметрами TOP и BOTTOM в настройках REGION:

- Если область будет размещена вверху структуры (параметр TOP), при этом задан параметр STAY, область будет размещаться в пределах от «Ytop» до «Ytop»-THICKNESS, а параметр «Ytop» останется на своем месте.

- Если новая область формируется внизу структуры (параметр ВОТТОМ), и задан параметр STAY, область будет находиться в пределах от «Ybottom» до «Ybottom»+THICKNESS, параметр «Ybottom» сохранит место расположения.

Рассмотрим использование параметра STAY на примере, в котором на структуре, показанной в предыдущем разделе, будут выполнены те же преобразования, что и в предыдущем разделе, только с использованием параметра STAY. Здесь новая область будет формироваться следующими командами:

REGION BOTTOM THICKNESS=0.1 MATERIAL=AlGaN NY=5 DONOR=1E17 X.COMP=0.2 REGION BOTTOM THICKNESS=0.5 MATERIAL=AlGaN NY=10 DONOR=1E18 X.COMP=0.2

```
REGION TOP STAY THICKNESS=0.02 MATERIAL=GaN NY=5
DONOR=1E16
REGION TOP THICKNESS=0.02 MATERIAL=Air NY=5
X.MIN=0.0
REGION TOP STAY THICKNESS=0.08 MATERIAL=AIGaN
NY=4 ACCEPTOR=1E17 X.COMP=0.2
REGION TOP THICKNESS=0.08 MATERIAL=Air NY=4
X MIN=0.0
```

В результате настройки новой области REGION позволили разбить область на 2 части (рис.).



Рис. 5. Настройка сетки параметром STAY

В данном примере параметр STAY выполняет следующие операции:

- Установленный в настройке третьей области параметр обозначает, что четвертая область будет начинаться с той же координаты Y, что и третья.

- Поскольку в третьей и четвертой областях параметры THICKNESS и NY аналогичны, величины областей по оси Y и шага сетки будут одинаковы. - Настройка X.MIN в четвертой области говорит о том, что эта область будет перекрывать область номер 3 частично – от 0 до значения X.MIN.

- Отсутствие параметра STAY означает, что область номер 5 будет располагаться поверх третьей и четвертой областей.

- Параметр STAY в 5 пятой области говорит о том, что шестая область начинается с тех же координат, что и пятая.

- Поскольку в пятой и шестой областях параметры THICKNESS и NY одинаковы, координаты и масштаб сетки по оси Y в них будут одними и теми же.

- Настройка X.MIN в шестой области говорит о том, что эта область будет перекрывать область номер 5 частично – от 0 до значения X.MIN.

2.4.4. Определение состава легирующей примеси

Для того чтобы задать степень легирования структуры или определенной области, необходимо либо самостоятельно настраивать сетку, либо ставить автонастройку.

В рассматриваемом методе можно устанавливать линейное распределение примеси в прямоугольной области. Настройка REGION позволяет задавать 8 новых параметров: ND.TOP, ND.BOTTOM, NA.TOP, NA.BOTTOM, COMPX.TOP, COMPX.BOTTOM, COMPY.TOP и COMPY.BOTTOM. В синтаксисе команд параметр «TOP» определяет «верхушку» или самую верхнюю координату Y в направлении отрицательных значений по оси; параметр «BOTTOM» определяет самый низ или самую дальнюю координату по оси Y в положительном направлении:

- Если в настройках REGION заданы команды ND.TOP и ND.BOTTOM, легирование донорной примесью выбранной области будет проводиться линейно от значения, указанного в

параметре ND.TOP «наверху» структуры до значения, заданного в параметре ND.BOTTOM «внизу» структуры.

- При определении настроек NA.TOP и NA.BOTTOM в REGION легирование акцепторной примесью будет линейно изменяться от значения, указанного в NA.TOP наверху структуры, до значения, указанного в параметре NA.BOTTOM внизу структуры.

- При задании настроек СОМРХ.ТОР и СОМРХ.ВОТТОМ в REGION, обозначение «Х.» будет линейно изменяться от величины, заданной в СОМРХ.ТОР в верхней части структуры до СОМРХ.ВОТТОМ внизу структуры (СОМРХ. – состав фракции по оси Х).

- Аналогично для настроек по оси Y: COMPY.TOP и COMPY.BOTTOM определяют линейное распределение состава фракций от верхней части структуры до нижней.

2.4.5. Сверхрешетки и распределённые брэгговские отражатели (DBR)

При автонастройке сетки масштабирования существует простой метод задания сверхрешеток (или более часто используемых распределенных брегговских отражателей). Сверхрешетка может быть задана как целое число повторений двух слоев из различных материалов. Под «различными» подразумевается то, что у двух слоев могут быть различные толщина, состав, степень легирования или все вместе. Такие структуры-конгломераты задаются с помощью параметров SUPERLATTICE и DBR и могут использоваться поочередно.

Основной блок синтаксиса параметра DBR аналогичен используемому в настройках REGION, при этом синтаксис записывается для двух областей, которые различаются индексами (1 и 2) в имени параметра:

MESH AUTO X.MESH LOCATION=-1.0 SPACING=0.1 X.MESH LOCATION=1.0 SPACING=0.1

DBR TOP LAYERS=4 THICK1=0.1 THICK2=0.2 N1=2 N2=3 MAT1=GaAs MAT2=AlGaAs X2.COMP=0.4

DBR BOTTOM LAYERS=3 THICK1=0.05 THICK2=0.075 N1=3 N2=3 MAT1=AlGaAs MAT2=GaAs X1.COMP=0.4

В данном примере используется автоматическая настройка сетки масштабирования (для команды MESH указан параметр AUTO). Основным новым параметром является LAYERS, который задает полное число добавленных областей. Область с номером «1» добавляется первой, за ней идет область с номером «2»; в зависимости от формируемого количества слоев, порядок областей будет выглядеть как 1, 2, 1, 2, 1, ...

На рисунке показан принцип работы DBR параметра, в результате настроек которого получены структура и сетка из кода выше.



Рис. 6. Принцип работы DBR параметра

2.5. Изменение областей, заданных из стороннего файла

При импортировании настроек MESH сетки структуры прибора из файла с помощью команды INFILE иногда бывает необходимо изменить некоторые параметры областей или структуры в целом. В этом случае в указанной области REGION задается параметр MODIFY и указывается его NUMBER (или NAME). Можно определять / переопределять следующие настройки REGION: ACCEPTORS, DONORS, LED, MATERIAL, NAME, POLAR.SCALE, POLARIZATION, QWELL, STRAIN, VNBS.GAIN, WELL, WELL.FIELD, WELL.GAIN, X.COMP и Y.COMP.

2.6. Перенастройка сетки с использованием языка программирования

Иногда бывает сложно задать оптимальную сетку при описании структуры на языке программирования. Основной сложностью является то, что в сетки поддерживают двумерные профили легирования, а рассчитанные p-n переходы очень сложны. В простой прямоугольной сетке используется избыточное количество узлов. Если в структуре используются только области с равномерным распределением примеси, изменять настройку сетки не нужно. Но если в структуре приведены реальные двумерные профили легирования, сетка должна быть перестроена.

Обычно для работы со сложными структурами в редакторе Atlas используется блок DevEdit, входящий в пакет SilvacoTCAD.

2.6.1 Перенастройка сетки на легируемой области

В редакторе Atlas существует возможность пересчета сетки для формирования более мелкоячеистых областей в выбранной области структуры. Для этого требуется указать место, в котором сетка будет пересчитана. Сетка станет мельче для более точного расчета заданных параметров. В тех местах, параметр (обычно выбранный степень легирования) гле изменяется слишком резко, сетки будет изменение шага происходить автоматически:

REGRID LOGARITHM DOPING RATIO=2 SMOOTH.KEY=4 DOPFILE=<filename1> \

OUTFILE=<filename2>

Перенастройка сетки может быть использована после задания параметров MESH, REGION, MATERIAL, ELECTRODE и DOPING. Влияние перенастройки сетки на простую структуру диода показано на рисунке.



Рис. 7. Перенастройка сетки

Здесь настройка сетки в 2 раза повысила качество построения профиля легирования.

2.6.2. Перенастройка сетки с использованием рассчитанных переменных

Параметр REGRID может использовать большое число рассчитанных переменных, по которым сетка будет оптимизироваться. Пересчет сетки по рассчитанным переменным может происходить только после самого расчета. После пересчета сетки проект должен быть пересохранен с теми же настройками:

REGRID POTENTIAL RATIO=0.2 MAX.LEVEL=1 SMOOTH.K=4 DOPFILE=<filename1>

SOLVE PREV

Перестройка сетки по потенциалу часто используется на мощных силовых приборах.

2.6.3. Основные поправки к настройке сетки моделирования

Настройка важнейших сетки является ОДНИМ ИЗ параметров моделирования прибора, но в ней необходимо находить компромисс между точностью и сложностью расчета. Под точностью понимается максимальное качество сетки для Сложность возрастает расчета структуры. расчета с увеличением числа узлов сетки.

«Узкими местами» при формировании сетки являются:

- сильные электрические поля на переходе сток/канал в MOSFET,

- поперечное электрическое поле под затвором в MOSFET,

- влияние рекомбинации вблизи перехода эмиттер/база в ВЈТ,

- области большой ударной ионизации,

- области вокруг гетеропереходов в биполярных гетеротранзисторах и транзисторах с высокой подвижностью электронов.

2.7. Задание областей четырехугольной формы

Кроме рассмотренных ранее областей прямоугольной формы, редактор Atlas позволяет задавать области со скошенными сторонами. В настройке REGION используются параметры P1.X, P1.Y, P2.X, P2.Y, P3.X, P3.Y, P4.X и P4.Y (в микрометрах). Здесь P1.X, P1.Y – XY координаты первого угла области.

Вся область должна быть расположены в границах сетки прибора. Для получения наилучших результатов координаты угла должны совпадать с существующими точками сетки, заданными в X.MESH и Y.MESH.

Поскольку вся сетка структуры должна быть прямоугольной, необходимо задавать области, заполненные вакуумом (VACUUM), в тех местах, которые дополняют созданную структуру до прямоугольника:

REGION NUMBER=3 MATERIAL=SILICON P1.X=0.0 P1.Y=1.0 P2.X=3.0 P2.Y=1.0 P3.X=3.5 P3.Y=2.5 P4.X=0.0 P4.Y=2.0

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΒ

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ И МОДЕЛЕЙ

были После заданы параметры того. как сетки. геометрические размеры распределение концентрации И носителей заряда в структуре, можно приступать к настройке заданные параметров электродов, менять ПО умолчанию параметры материалов и определять, какая из физических моделей модуля Atlas будет задействована при моделировании модели прибора используются прибора. Лля создания CONTACT, MATERIAL и MODELS. Модель параметры ударной ионизации может быть подключена командой IMPACT. Свойства поверхности задаются настройкой параметра INTERFACE. Многие параметры можно настраивать с помощью Silvaco C-Interpreter (SCI).

Задание параметров контактов (CONTACT). 3.1. Работа выхода затвора и контактов Шоттки

Электрод, находящийся в контакте с полупроводниковым материалом, по умолчанию установлен как омический контакт. Если у него известна работа выхода, электрод становится контактом Шоттки. Параметр CONTACT используется для определения работы выхода для одного и более электродов. Имя параметра NAME позволяет определить, свойства какого Параметр WORKFUNCTION электрода изменяются. задает работу выхода электрода. Например, команда:

CONTACT NAME=gate WORKFUNCTION=4.8 задает работу выхода электрода затвора равной 4,8 эВ. Работы выхода наиболее распространенных материалов контакта могут материала (ALUMINUM, только названием быть заданы P.POLYSILICON, N.POLYSILICON, TUNGSTEN И TU.DISILICIDE). Пример задания работы выхода контакта затвора из поликремния п-типа проводимости:

CONTACT NAME=gate N.POLYSILICON

Контакт алюминия на сильнолегированном кремнии всегда будет омическим. В этом случае работа выхода контакта не задается. Например, в МОП-транзисторе не будет использоваться запись:

CONTACT NAME-drain ALUMINUM

С помощью параметра CONTACT также можно задавать величину барьера и его снижение количества диполей. Для задания величины снижения барьера задается параметр BARRIER, а параметр ALPHA определяет уменьшение количества диполей. Например, команда:

CONTACT NAME=anode WORKFUNCTION=4.9 BARRIER ALPHA=1.0e-7

задает работу выхода контакта Шоттки на аноде 4,9 эВ, включает снижение барьера и устанавливает коэффициент уменьшения диполей на 1 нм.

Если барьер Шоттки задан как контакт, рекомендуется задавать более мелкую сетку по оси Y в полупроводниковой области под контактом. Таким образом, область обеднения под барьером Шоттки будет промоделирована с более высокой точностью.

3.1.1. Задание параметров управления электродами по току

С помощью параметра CONTACT также можно менять электродом с напряжения на ток. Электроды, управление используются управляемые током, моделировании при приборов, в которых ток очень чувствителен к изменению напряжения находится или в сложной зависимости **OT** напряжения (область ВАХ после отсечки или скачок характеристики).

> Команда: CONTACT NAME=drain CURRENT

определяет электрод стока как управляемый током. Для моделирования используются методы группового деления (BLOCK) и Ньютона (NEWTON).

3.1.2. Задание внешних резисторов, конденсаторов и индуктивностей

Суммарные сопротивление, емкость и индуктивность на электродах структуры могут быть заданы с помощью параметров RESISTANCE, CAPACITANCE и INDUCTANCE при определении контакта. Например, команда:

CONTACT NAME=drain RESISTANCE=50.0 CAPACITANCE=20e-12 INDUCTANCE=1e-6

электроде показывает. ЧТО на стока находится сопротивление, эквивалентное параллельному резистору 50 Ом, 20 пΦ. включенные последовательно и емкость с индуктивностью 1 мкГн. При двумерном моделировании структуры задаются с помощью ширины прибора (третье измерение). Так в двумерной модели редактора Atlas ширина структуры 1 мкм равна сопротивлению 50 Ом×мкм.

Распределенное сопротивление электрода может быть задано с использованием параметра CON.RESIST:

CONTACT NAME=source CON.RESISTANCE=0.01

Здесь контакт истока имеет сопротивление 0,01 Ом×см².

При моделировании структуры с внешними сопротивлениями, емкостями и индуктивностями используются методы группового деления (BLOCK) и Ньютона.

3.1.3. Плавающие контакты

Параметр CONTACT также может задавать плавающие электроды. Плавающие электроды используются в двух случаях: (а) плавающий электрод затвора в EEPROM (электронноперепрограммируемая постоянная память) и других программируемых приборах; (б) моделирование контакта непосредственно на полупроводниковом материале, например, плавающего поля в силовом приборе.

Для задания плавающего затвора используется параметр FLOATING для команды CONTACT:

CONTACT NAME=fgate FLOATING

Здесь электрод с именем «fgate» будет плавающим и к нему будут применяться эффекты изменения заряда на границе области, характерные для плавающих контактов.

Для контактов, заданных непосредственно на полупроводнике, используется управление током:

CONTACT NAME=drain CURRENT

Здесь электрод стока управляется током. Чтобы контакт стал плавающим, при расчете (SOLVE) по умолчанию ток будет равен 0.

Еще одним методом создания плавающего контакта к полупроводнику может быть использование очень большого сопротивления на контакте:

CONTACT NAME=drain RESIST=1e20

Надо отметить, что очень большие сопротивления можно использовать чтобы снизить ток через контакт до незначительных величин. Использование такого резистора дает допуск по потенциалу немного выше 0. Например, если допуск равен 10^{-5} B, а сопротивление на контакте задано 10 МОм×мкм, ток через контакт будет равен 10^{-12} А/мкм, что дает точное моделирование пробоя.

3.1.4. Закорачивание двух контактов

В редакторе Atlas можно соединять вместе два и более контакта так, что напряжения на них будут одинаковыми. Этот подход используется во многих приборах, например, в транзисторах с двойной базой. В зависимости от того, как

изначально была задана структура, можно использовать несколько техник закорачивания контактов.

Если структура прибора была задана с помощью описания модуля Atlas, электроды ELECTRODE с идентичными именами NAME, расположенные в разных местах прибора, можно объединять в один. Расчетный модуль будет определять одно и то же напряжение на данных областях. Ток будет рассчитываться сложением токов, текущих через области.

Если структура была построена в редакторе Athena, две области металлизации электродов с одним и тем же именем в модуле Atlas будут считаться закороченными.

Если при определении структуры электродам были присвоены разные имена, то для их объединения можно использовать следующий код:

CONTACT NAME=base1 COMMON=base

SOLVE VBASE=0.1

Здесь электрод basel будет связан с электродом base. Прикладываемое к base напряжение 1 В будет приложено и к base1. При этом токи, текущие через эти электроды, будут рассчитываться по отдельности. Иногда такая возможность дальнейших расчетов, но при полезна ЛЛЯ извлечении параметров структуры или построении графиков функции она нежелательна. Чтобы ее исключить, в настройки CONTACT добавляется команда SHORT, которая говорит о том, что рассчитываться будет только один ток базы (как сумма токов base и base1). Если электроды заданы через параметр СОММОN, для оптимизации работы оператора их имена в параметре ELECTRODE должны быть похожими. На электроды с заданным именем не должно быть приложено смещение. Смещение задается через команду СОММОN.

Напряжения на связанных электродах также можно задавать со смещением одно относительно другого.

Команда:

CONTACT name=base1 COMMON=base FACTOR=0.5

говорит о том, что напряжение на электроде **base1** будет равно напряжению на электрода **base** + 0.5 В. Если в настройках параметров контакта указать MULT, команда FACTOR будет множителем для увеличения напряжения. В этом случае смещение, прикладываемое к **base1**, будет равно половине смещения электрода **base**. Если команда FACTOR (и если требуется, MULT) привязана к контакту, на котором прописаны параметры границы области, множитель или увеличение не сработает.

Если параметры структуры с закороченными электродами загружаются из модулей Athena или DevEdit, Atlas автоматически закоротит их и присвоит имя электрода, заданного первым.

3.1.5. Изготовление контакта разомкнутой цепи

Зачастую возникает необходимость моделирования разомкнутой цепи на одном из созданных электродов. Для задания контакта разомкнутой цепи существуют три метода. Вопервых, полное удаление электрода из файла структуры. Вовторых, добавление очень большого сосредоточенного сопротивления, (например, 10^{20} Ом на контакте позволяют «открыть» схему). В третьих, задание параметров границ контакта переключением управления схемы с напряжения на ток и установление нулевого или очень малого тока на электроде.

Каждый из методов может быть использован. Однако если в структуре присутствуют плавающие области, расчет по первому и третьему методам может не сойтись. Рекомендуется использовать большие сопротивления.
3.2. Настройка свойств материалов

3.2.1. Полупроводники, диэлектрики и проводники

Все материалы, используемые в полупроводниковой промышленности, можно разделить на три основных класса: полупроводники, диэлектрики и проводники. Каждый класс имеет свои собственные параметры, настройки которых могут быть заданы при моделировании. Для полупроводников такими изменяемыми параметрами могут стать сродство к электрону, ширина запрещенной зоны, плотность состояний и скорость насыщения.

В САПР ТСАD для свойств всех полупроводниковых, диэлектрических и проводящих материалов заданы примерные значения, которые оператор может подстраивать под собственные задачи.

3.2.2. Задание параметров

Команда MATERIAL позволяет настраивать основные параметры используемого материала. Можно задавать настройки как конкретного материала, так и конкретной области. Например, команда:

MATERIAL MATERIAL=Silicon EG300=1.12 MUN=1100 устанавливает ширину запрещенной зоны и подвижность электронов в слабом поле для всех областей прибора, изготовленных из кремния;

команда:

MATERIAL REGION=2 TAUN0=2e-7 TAUP0=1e-5

говорит о том, что время жизни электронов и дырок при рекомбинации Шоккли-Рида-Холла в области №2 (см. "Shockley-Read-Hall (SRH) Recombination" на стр. 3-206) равно 2×10⁻⁷ и 10⁻⁵ секунд, соответственно. Если имя электрода было задано с использованием параметра NAME в области REGION, код:

MATERIAL NAME=base NC300=3e19

задает плотность состояний в зоне проводимости при 300 К для области, названной **base**.

3.2.3. Гетеропереходные материалы

Свойства материалов гетероструктур также можно параметра MATERIAL. Здесь помощью настраивать с к материала добавляются эффекты. обычным свойствам при соединении материалов. Например, возникаюшие изменение ширины запрещенной зоны и зонной структуры в целом, диэлектрических постоянных, скорости насыщения.

гетероструктурных систем различие Для ширины запрещенной зоны материалов будет определяться валентными зонами и зонами проводимости обоих материалов. Параметр ALIGN определяет область, соответствующую изменению зоны проводимости. Он определяется высотой барьера для электронов и дырок и меняется с изменением сродства к электрону. Например:

MATERIAL MATERIAL=InGaAs ALIGN=0.36

MATERIAL MATERIAL=InP ALIGN=0.36

Код говорит о том, что 36% изменения ширины запрещенной зоны на гетеропереходе InGaAs и InP будет связано с зоной проводимости, а 64% - с валентной зоной. Например, если ширина запрещенной зоны (Eg) в этой системе равна 0,6 эВ, зона проводимости будет расположена на высоте 0,216 эВ, а валентная зона – на высоте 0,384 эВ.

В гетероструктурных приборах для каждого из материалов может быть задана своя модель переноса. Эти модели, а также другие коэффициенты для каждого материала можно настроить с помощью команды задания моделей MODELS.

3.3. Определение параметров границ областей

INTERFACE Команла используется ЛЛЯ задания плотности заряда на границах материалов И степени поверхностной рекомбинации на границах между полупроводником и диэлектриком. Например:

INTERFACE QF=3e10

Код примера указывает, что заряд на границе полупроводник – диэлектрик равен 3×10¹⁰ см⁻². В некоторых ситуациях параметры границы могут быть заданы для конкретной области. Прямоугольная область ограничивается параметрами X.MIN, X.MAX, Y.MIN и Y.MAX в блоке INTERFACE.

Например:

INTERFACE QF=3e10 X.MIN=1.0 X.MAX=2 Y.MIN=0.0 Y.MAX=0.5

Блок команд задает заряд на границе полупроводник – диэлектрик в заданной области.

3.4. Настройка физических моделей

Физические модели в САПР TCAD задаются с использованием параметров MODELS и IMPACT. Настройки моделей присутствуют во многих элементах кода структуры: MODELS, IMPACT, MOBILITY и MATERIAL.

Физические модели могут быть сгруппированы в 5 классов: подвижности, рекомбинации, статистики носителей заряда, ударной ионизации и туннелирования. Подробная информация по каждой из моделей расположена в разделе 3.6 «Физические модели».

В таблицах 1-5 представлена сводная информация и рекомендации по использованию каждой модели. Таблица 6 дает представлении о совместимости моделей.

38

Все модели, за исключением ударной ионизации, задаются с помощью параметра MODELS. Ударная ионизация настраивается с помощью параметра IMPACT. Например, команда:

MODELS CONMOB FLDMOB SRH FERMIDIRAC

IMPACT SELB

говорит используются стандартная том, 0 зависимость подвижности от концентрации, зависимость подвижности от параллельного поля, рекомбинация Шоккли-Рида-Холла с заданным временем жизни носителей заряда, статистика Ферми-Шелбергерра. ионизация Дирака ударная Atlas дает И подобрать возможность просто модели лостаточно под разрабатываемую технологию.

Параметры MOS, BIP, PROGRAM и ERASE при задании модели дают основные настройки подвижности, рекомбинации, статистики носителей заряда и туннелирования. Параметры MOS и BIP активируют модели, пригодные для расчета МОП и биполярных структур, соответственно. Например, команда:

MODELS MOS PRINT подключает модели CVT, SRH и FERMIDIRAC, а команда: MODELS BIPOLAR PRINT

подключает модели CONMOB, FLDMOB, CONSRH, AUGER и BGN. Если при задании MODELS указана команда LAT.TEMP или параметр TEMPERATURE отличается от 300К более чем на 10К, модель CONMOB меняется на ANALYTIC автоматически.

Необходимо отметить, что параметр PRINT запускает листинг времени выполнения моделей и параметров, которые будут подключаться при моделировании. Таким образом можно проверить выбранные модели и параметры. Этот параметр рекомендуется использовать при задании моделей.

Физические модели могут быть применены к материалам при их определении. Такой подход удобно использовать при работе с гетеропереходами и моделировании структур, в которых полупроводниковые области заданы с нестандартными параметрами и имеют нетипичные характеристики. Например, код:

MODEL MATERIAL=GaAs FLDMOB EVSATMOD=1 ECRITN=6.0e3 CONMOB

MODEL MATERIAL=InGaAs SRH FLDMOB EVSATMOD=1 ECRITN=3.0e3

одновременно изменяет настройку моделей подвижности и электрического поля для каждого материала. В случае приборов, работающих на нестандартных материалах, параметры моделей должны задаваться только после их анализа.

3.4.1. Модель энергетического баланса

Классическая диффузионно-дрейфовая модель переноса учитывает нелокальные дефекты, такие заряда не как перерегулирование по скорости и снижение зависимости от энергии при ударной ионизации. Редактор Atlas может эффектов учитывать влияние с помощью этих модели энергетического баланса. которой используется В аппроксимация уравнения переноса Больцмана более высокого уровня. В нем параметры переноса (подвижность и ударная ионизация) большей функциями степени являются В температуры носителей заряда в выбранной области, а не электрического поля в ней.

Для задания транспортной модели энергетического баланса используются параметры HCTE, HCTE.EL или HCTE.HO. Они активируют модель переноса энергии для обоих носителей заряда, для электронов и для дырок, соответственно. Например, код:

MODELS MOS HCTE

подключает транспортную модель энергетического баланса для электронов и дырок к стандартным моделям МОП технологии.

3.4.2. Сводные таблицы по моделям

Таблица 2

3.6		
Молепи и	иосителеи.	22ng 12
тиодоли і	IOCHICIICH	зарлда

Модель	Синтаксис	Комментарии
Больцмана	BOLTZMANN	используется по
		умолчанию
Ферми-Дирака	FERMI	снижение концентрации
		носителей заряда в
		сильнолегированных
		областях (статистическое
		исследование)
Неполной ионизации	INCOMPLETE	подходит для
		«вымораживания»
		легирующей примеси;
		обычно используется при
		низких температурах
Ионизации кремния	IONIZ	используется при полной
		ионизации для
		сильнолегированного Si;
		используется вместе с
		INCOMPLETE
Сужения	BGN	используется для сильно
запрещенной зоны		легированных областей;
		отлично работает для
		усиления в биполярных
		транзисторах; использует
		модель Клаассена

Модели управления подвижностью

Модель	Синтаксис	Комментарии				
Зависимости от	CONMOB	использование табличных				
концентрации		значений для Si и GaAs при				
носителей заряда		300К, используется простая				
-		степенная зависимость				
Зависимости от	ANALYTIC	формула Коги-Томаса				
концентрации		(Caughey-Thomas),				
носителей заряда и		адаптированная для				
температуры		температур от 70 до 450К				
Арора	ARORA	аналог аналитической модели				
		в переложении для Si				
Рассеяния на носителях	CCSMOB	модель Доркеля-Летарка				
заряда		(Dorkel-Leturq); включает в				
_		себя зависимости n, N и T;				
		используется при высокой				
		концентрации носителей				
		заряда (силовые приборы,				
		работающие на смещении в				
		прямом направлении)				
Зависимости от	FLDMOB	используется для Si и GaAs;				
параллельного		позволяет моделировать все				
электрического поля		виды скорости насыщения				
Таша (Tasch)	TASCH	содержит зависимости от				
		поперечного поля;				
		используется только для				
		планарных приборов;				
		работает с четко прописанной				
		подробной сеткой				
Уатта (Watt)	WATT	модель поперечного поля,				
		приложенная к узлам на				
		поверхности				
Клаассена (Klaassen)	RLA	содержит зависимости				
		N, n и T; разделяет				
		подвижность на				
		основные и неосновные				
		заряды; используется в				
		биполярных приборах				

		Продолжение табл. 3
Ширахата (Shirahata)	SHI	содержит N и
		поперечное Е; в
		качестве одного из
		вариантов подели
		подвижности может
		быть объединена с KLA
Измененная Уатта	MOD.WATT	расширение модели
		Уатта на узлы,
		находящиеся не на
		поверхности;
		использует влияние
		постоянного
		поперечного Е;
		оптимальна для
		планарных МОП
		структур
Ломбарди (Lombardi,	CVT	обобщенная модель,
CVT)		содержащая N, T,
		поперечное и
		параллельное Е;
		подходит для
		непланарных приборов
Ямагучи (Yamaguchi)	YAMAGUCHI	содержит N, поперечное
		и параллельное Е; была
		рассчитана только для 300К

Таблица 4

Модели рекомбинации

Модель	Синтаксис	Комментарии			
Шоккли-Рида-Холла	SRH	используется постоянное			
		минимальное время			
		жизни носителей заряда;			
		основная для			
		большинства			
		моделирований			

		Продолжение табл. 4
Зависимости от	CONSRH	используется
концентрации носителей		зависимость времени
заряда		жизни от концентрации
		носителей заряда;
		рекомендуется для Si
Аугера	AUGER	прямой перенос трех
		видов носителей заряда
		(основные и неосновные
		в материале +
		легирующая примесь);
		используется при
		больших плотностях
		тока
Оптическая	OPTR	рекомбинация зона-зона;
		только для прямозонных
		материалов
Поверхностная	S.N	рекомбинация на
	S.P	границе полупроводник-
		диэлектрик; параметры
		задаются при настройке
		INTERFACE

Таблица 5

Модели ударной ионизации.

Модель	Синтаксис	Комментарии		
Шелбергерра	IMPACT SELB	используется в		
(Selberherr)		большинстве расчетов;		
		использует параметры,		
		зависящие от		
		температуры		
Гранта (Grant)	IMPACT GRANT	аналогична модели		
		Шелбергерра, но		
		другими		
		коэффициентами		
Кроуэла-Зи (Crowell-	IMPACT CROWELL	использует зависимость		
Sze)		от длины пробега		
		носителей заряда		

Продолжение табл. 5

		1 / 1
Тояби (Toyabe)	IMPACT TOYABE	нелокальная модель,
		используемая вместе с
		энергетическим
		балансом; часть
		синтаксиса из ІМРАСТ
		исключена
Конканнона	N.CONCAN	нелокальная модель,
(Concannon)	P.CONCAN	разработанная для флешь
		ПЗУ технологий

Таблица 6

Модели туннелирования и инжекции носителей заряда

Модель	Синтаксис	Комментарий		
Зона-зона (band-to-band)	BBT.STD	для прямых переходов;		
		работает при очень		
		сильных полях		
Модель тока на затворе	N.CONCAN	объединение модели		
Конканнона	P.CONCAN	непостоянного затвора и		
		модели тока в подложке		
		Конканнона		
Прямое квантовое	QTUNN.EL	квантовое		
туннелирование		туннелирование сквозь		
(электронов)		барьер зоны		
		проводимости при		
		наличии диэлектрика		

Расшифровка табличных значений:

MODEL ABBREVIATION = будет ли работать модель в заданном сочетании.

ОК = комбинация моделей допустима.

NO = комбинация моделей недопустима.

Таблица 7

Совместимость моделей

	CONMOB	FLDMOB	TFLDMOB2	YAMAGUC HI	CVT	ARORA	ANALYTIC	CCSMOB	SURMOB	LATTICE H	E.BALANCE
CONMOB	-	OK	OK	YA	CV	AR	AN	CC	OK	OK	OK
FLDMOB	OK	-	TF	YA	CV	OK	OK	OK	OK	OK	OK
TFLDMOB2	OK	TF^1	-	YA	CV	OK	OK	TF	TF	OK	OK
YAMAGUCHI	YA	YA	YA	-	CV	YA	YA	YA	YA	NO	NO
CVT	CV	CV	CV	CV	-	CV	CV	CV	CV	OK	OK
ARORA	AR	OK	OK	YA	CV	-	AR	CC	OK	OK	OK
ANALYTIC	AN	OK	TF	YA	CV	AR	-	CC	OK	OK	OK
CCSMOB	CC	OK	TF	YA	CV	CC	CC	-	OK	OK	OK
SURMOB	OK	OK	TF	YA	CV	OK	OK	OK	-	OK	OK
LATTICE H	OK	OK	OK	NO	OK	OK	OK	OK	OK	-	OK
E.BALANCE	OK	OK	OK	NO	OK	OK	OK	OK	OK	OK	2

Сноски:

1. Используется встроенная модель, аналогичная FLDMOB

2. Если модели, использующие влияние параллельного электрического поля, используются одновременно с энергетическим балансом, электрическое поле заменяется функцией зависимости от температуры носителей заряда.

3.5. Настройки методов расчета структур в Silvaco TCAD

Команда МЕТНОД позволяет задавать методы численного расчета для решения уравнений и параметров структур.

Численные методы решения используются для расчета влияния различных факторов на полупроводниковые структуры. Основные команды настройки методов расположены в главе 22.35 руководства к модулю Atlas. Различные сочетания моделей технологических процессов используют три типа методов расчета: (а) раздельный (GUMMEL), (б) касательных (NEWTON), (в) BLOCK. Метод Гуммеля рассчитывает каждое неизвестное с использованием заданных переменных С повторением процесса до сведения результата к постоянной методе Ньютона величине. B вся система неизвестных рассчитывается одновременно. Метод группового деления рассчитывает часть уравнений в системе, а часть по отдельности.

Метод Гуммеля обычно используется в случае, когда система уравнений слабо связана, но имеет только линейную сходимость. Метод Ньютона удобен, когда система уравнений сильно связана и имеет квадратичную сходимость. Так же метод выражений. Ньютона использовать для расчета можно содержащих постоянные или слабо связанных между собой. Метод группового деления можно использовать для ускорения расчетов (по сравнению с методом Ньютона). Метод Гуммеля дает лучшее начальное приближение и может быть полезен для расчетов (несколько итераций), начальных тогла как дальнейший расчет проводится методом Ньютона.

> Методы расчета задаются в тексте программы: METHOD GUMMEL BLOCK NEWTON

3.5.1. Расчет диффузионно-дрейфовой модели

Изотермическая диффузионно-дрейфовая модель содержит 3 уравнения для расчета потенциала, концентрации электронов и концентрации дырок. Обычно для расчета используется метод Ньютона, заданный в Silvaco TCAD по умолчанию.

Команда на задание метода расчета: METHOD GUMMEL NEWTON определяет, что первые итерации будут проводиться по методу Гуммеля, а если расчет не сойдется, будет подключен метод Ньютона. Такая технология расчета достаточно надежна, но более длительна в случае расчета сложных структур. Метод рекомендуется использовать для моделирования приборов с изолированными областями (например, КНИ-транзисторов). «Плавающие» области задаются с определенной концентрацией примеси и отделены от всех электродов р-п переходом.

Метод группового деления аналогичен методу Ньютона во всех изотермических диффузионно-дрейфовых моделях.

3.5.2. Расчет диффузионно-дрейфовой модели с учетом тепловых воздействий на кристаллическую решетку

Если в диффузионно-дрейфовую модель добавить влияние нагрева кристаллической решетки, в ней появляется дополнительное уравнение. Алгоритм группового деления и Ньютона рассчитывают 3 основных уравнения. Их можно дополнить методом Гуммеля, который обсчитывает уравнения теплового потока.

Метод Ньютона может рассчитать все 4 уравнения вместе. Его удобно использовать при высоких температурах. Если температура изменяется медленно, процесс будет рассчитан быстрее методом группового деления.

> Обычно используется комбинация методов: МЕТНОВ BLOCK NEWTON

3.5.3. Расчет энергетического баланса

Модель энергетического баланса предполагает решение 5 связанных уравнений. Как и в диффузионно-дрейфовой модели, результаты расчета по методам Гуммеля и Ньютона будут идентичны. Метод группового деления объединяет расчет потенциала и непрерывности распределения носителей заряда, а далее рассчитывает энергетический баланс вместе с распределением носителей заряда.

Между методами группового деления и Ньютона можно переключаться объединением их последовательности в одну строку кода программы:

METHOD BLOCK NEWTON

Расчет начинается по методу группового деления, а если сходимость отсутствует, переходит на метод Ньютона.

3.5.4. Расчет энергетического баланса с учетом тепловых воздействий на кристаллическую решетку

Если моделирование энергетического баланса проходит в неизотермических условиях, для расчета используется система из 6 уравнений. Методы Гуммеля и Ньютона обсчитывают их поочередно и одновременно, соответственно. Метод группового деления сначала проводит расчет уравнений энергетического баланса, а после них – нагрев кристаллической решетки.

3.5.5. Задание числа носителей заряда

Модуль Atlas может рассчитывать как одновременно, так и по отдельности уравнения непрерывности электронов и дырок. Для определения количества носителей заряда используется команда:

METHOD CARRIERS=2

Код задает расчет с использованием 2 носителей заряда (указан по умолчанию).

Если расчет проводится только с использованием электронов или только с использованием дырок, необходимо указать тип носителя заряда в качестве параметра: ELEC или HOLE. Например, для расчета только с использованием дырок в методе будет записано:

METHOD CARRIERS=1 HOLE

Если требуется рассчитать только потенциал, носители заряда отсутствуют:

METHOD CARRIERS=0

3.5.6. Параметры команды МЕТНОО

Во всех численных методах расчета комплекс TCAD позволяет редактировать параметры процесса. Однако если оператор не знает структуру численных методов расчета в значительной степени, изменять их не рекомендуется. Все параметры заданы с оптимальными значениями для большинства моделируемых процессов.

Тем не менее, есть несколько параметров, которые стоит отметить:

CLIMIT или CLIM DD залает a) минимальные значения концентрации носителей заряда для расчета. В некоторых случаях для расчета характеристик пробоя их требуется уменьшить. Для моделирования пробоев обычно используется CLIMIT=1e-4, концентрация носителей заряда в Параметр CLIM.DD предпробойной области очень мала. эквивалентен CLIMIT, но в качестве единиц измерения значений концентраций граничных использует $[cm^{-3}].$ Параметры CLIMIT и CLIM.DD связаны выражением

 $CLIM.DD = CLIMIT * \sqrt{N_c N_v}.$

б) DVMAX определяет максимальный шаг изменения потенциала на каждую итерацию в методе Ньютона. По умолчанию он равен 1 В. Для силовых приборов, работающих на больших напряжениях, можно увеличить значение DVMAX. Величина DVMAX=10⁸ может увеличить скорость шагов расчета на больших напряжениях.

в) CLIM.EB определяет нижнюю границу отсечки концентрации носителей заряда, которая используется для защиты от ошибок при расчете температурных зависимостей носителей заряда. Параметр используется в моделировании энергетического баланса для исключения лишних расчетов температурных зависимостей в областях структуры с низкой концентрацией носителей заряда. Если установить значение этого параметра слишком большим (в областях, в которых Atlas не воспринимает ошибки расчета температуры), результаты моделирования будут некорректными.

4. РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК

В редакторе Atlas можно проводить расчеты на постоянном токе (DC), на малосигнальном переменном токе (AC), а также считать передаточные характеристики. Расчет проходит аналогично настройке параметрического теста оборудования для исследуемого прибора.

Обычно на каждом электроде прибора задаются напряжения. Atlas считает ток на каждом электроде. Также рассчитываются промежуточные величины - концентрация носителей заряда и электрические поля в приборе.

При любом моделировании начальное смещение на всех электродах прибора равно «0». Расчет происходит посредством приложения смещения заданной величины к электродам. Величина шага по напряжению является ограниченной. Для сохранения расчета используются команды LOG или SAVE.

4.1. Решения на постоянном токе

При решениях на постоянном токе напряжение на каждом электроде задается с использованием параметра SOLVE: SOLVE VGATE=1.0 SOLVE VGATE=2.0

Данная команда рассчитывает единичное смещение электрода затвора сначала на 1 В, затем на 2 В. Если при данном конкретном расчете напряжение на каком-либо электроде не задано, оно будет взято из последнего расчета SOLVE.

В данном примере второй расчет происходит при напряжении сток-исток 1 В и напряжении затвор-исток 2 В:

SOLVE VGATE=2.0

SOLVE VDRAIN=1.0

Когда напряжение на конкретном электроде ранее не задавалось, оно будет нулевым.

4.2. Задание смещения

Для большинства расчетов требуется задание смещения на одном или нескольких электродах. Вместо стандартного смещения на постоянном токе, которое задать достаточно сложно, используется наклон кривой. Чтобы задать изменение напряжения базы от 0 В до 1 В с шагом 0.05 В и постоянный ток коллектора 2 В используется следующий синтаксис:

SOLVE VCOLLECTOR=2.0

SOLVE VBASE=0.0 VSTEP=0.05 VFINAL=1.0 NAME=base

Параметр NAME определяет имя электрода (чувствителен к регистру). Необходимо так же учитывать, что если задать смещение от 0 до 1.5 В с шагом 0.2 В, расчет будет завершен на 1.4 В или 1.6 В.

4.3. Создание семейства кривых

В большинстве случаев при измерении параметров MOSFET Id/Vds и биполярных Ic/Vce требуется построение семейств кривых. Такое семейство кривых можно построить проведением расчетов на каждой точке смещения параметра; далее по рассчитанным точкам строится график.

Например, в зависимости тока стока от напряжения стокисток в MOSFET решения для каждого значения Vgs проходят на Vds = 0 V. Результат сохраняется в файл. На каждом смещении затвора сохраненный файл подгружается и происходит изменение величины напряжения сток-исток на заданную величину.

Семейство характеристик для трех напряжений на затворе (от 1 В до 3 В с шагом 1 В) и изменении напряжения сток-исток от 0 В до 3.3 В с шагом 0.3 В может быть записано как:

```
SOLVE VGATE=1.0 OUTF=solve_vgate1
SOLVE VGATE=2.0 OUTF=solve_vgate2
SOLVE VGATE=3.0 OUTF=solve_vgate3
```

```
LOAD INFILE=solve_vgate1
LOG OUTFILE=mos_drain_sweep1
SOLVE NAME=drain VDRAIN=0 VFINAL=3.3 VSTEP=0.3
```

LOAD INFILE=solve_vgate2 LOG OUTFILE=mos_drain_sweep2 SOLVE NAME=drain VDRAIN=0 VFINAL=3.3 VSTEP=0.3

LOAD INFILE=solve_vgate3 LOG OUTFILE=mos_drain_sweep3 SOLVE NAME=drain VDRAIN=0 VFINAL=3.3 VSTEP=0.3

Команда LOG используется для сохранения зависимости Id/Vds при каждом значении напряжения на затворе в отдельный файл.

4.4. Необходимость задания начального приближения

Для обеспечения сходимости уравнений, по которым проводится расчет, необходимо задавать правильное начальное значение переменных, которые будут определяться на каждой точке смещения. При расчете в Atlas используется начальное приближение, которое обеспечивает схождение уравнения. При изотермического смещения моделировании диффузии переменными являются потенциал и концентрации обоих носителей заряда. Если задана правильная сетка, ошибки в расчете ΜΟΓΥΤ возникнуть из-за неверного начального приближения.

При задании смещения начальное приближение расчета какой-либо точки будет определяться как проекция с двух предыдущих расчетов. Сложности возникают в начале смещения, когда предыдущих результатов еще нет. Если есть хотя бы один расчет, он будет использован. Именно поэтому в следующих двух примерах будет получаться различный результат (в первом случае проблемы со сходимостью будут больше):

1. SOLVE VGATE=1.0 VDRAIN=1.0 VSUBSTRATE=-1.0

2. SOLVE VGATE=1.0 SOLVE VSUBSTRATE=-1.0 SOLVE VDRAIN=1.0

В первом случае одно и то же решение обусловлено напряжением на всех заданных электродах в 1 В. Во втором случае сначала будет использовано значение 1 В напряжения на затворе, смещение на остальных электродах равно 0 В. Далее, учитывая, что на затворе 1 В, потенциал на подложке вырастет до -1 В, при этом появится еще одно решение. И наконец, при наличии смещения подложки и затвора добавляется потенциал на стоке и проводится еще один расчет. Преимуществом такого

54

метода над первым является то, что небольшое пошаговое изменение напряжения дает более верные начальные значения расчетов на каждом этапе.

Обычно метод проекций начальных значений величин хорошо моделирует линейные ВАХи. Если ВАХ нелинейна или режим работы прибора изменился, могут возникнуть ошибки расчета. Ошибки обычно возникают в областях на пороговых напряжений или напряжения пробоя – в этом случае принято задавать более мелкий шаг напряжений. Необходимо помнить, что в редакторе Atlas существуют параметры, такие как TRAP, которые позволяют автоматически изменять шаг напряжения в нелинейных областях.

4.5. Начало расчета

Если в проекте расчет является первым, начальные приближения потенциала и концентрации носителей заряда могут быть определены из профиля легирования. Поэтому первый расчет может быть построен при нулевом смещении (термодинамическое равновесие):

SOLVE INIT

Если данная команда не определена, редактор Atlas сначала рассчитает начальные приближения, а затем перейдет к блоку команд SOLVE.

4.6. Первый и второй ненулевые расчеты

Исходя из поведения редактора Atlas, было определено, что первый и второй расчеты на ненулевых смещениях плохо обеспечивают сходимость расчетов. Если эти два значения определены, алгоритм будет работать с высокой точностью.

Для первых двух расчетов необходим результат базового расчета, который будет использоваться как основа для начального приближения. Поскольку базовый расчет происходит при нулевом смещении, он обеспечивает плохое начальное приближение.

На практике обычно используется прием, при котором первое и второе ненулевые решения происходят при очень малых изменениях напряжения. В примере в первом случае будет обеспечена достаточная сходимость, а во втором – нет:

1. SOLVE INIT

SOLVE VDRAIN=0.1 SOLVE VDRAIN=0.2 SOLVE VDRAIN=2.0

2. SOLVE INIT SOLVE VDRAIN=2.0

4.7. Задание остановки метода при отсутствии сходимости

Несмотря на то, что в редакторе Atlas используются определенные методы компенсации, направленные на уменьшение погрешности и начальных приближений для расчета сходимости, необходимо наиболее корректно задавать параметры начальных значений приближения. Одним из наиболее простых методов оптимизации для обеспечения сходимости расчета является команда:

METHOD TRAP

Она установлена по умолчанию и уменьшает шаг смещения в том случае, когда сходимость не выполняется. Рассмотрим приведенный ранее код:

SOLVE INIT

SOLVE VDRAIN=2.0

Если второй оператор SOLVE не сходится, TRAP автоматически уменьшит шаг смещения в половину и проведет пересчет для Vd = 1.0V. Если решение опять не сойдется, смещение по напряжению уменьшится до 0.5 В. Процедура будет повторяться до максимального числа разделений,

заданного в параметре MAXTRAPS настройки METHOD. Если расчет сошелся, шаг смещения снова увеличивается до 2 В. По умолчанию MAXTRAPS = 4, это значение не рекомендуется увеличивать, поскольку быстрее в коде изменить шаг смещения, а не ждать автоматического пересчета.

Возможность создания дополнительных уровней приближения бывает полезна при расчете сходимости вблизи точек изменения режима работы прибора (напрмер, около порогового напряжения). Синтаксис для расчета зависимости тока стока от напряжения затвор-исток в MOSFET выглядит как:

SOLVE VGATE=0.0 VSTEP=0.2 VFINAL=5.0 NAME=gate

Примем, что пороговое напряжение в данном транзисторе равно 0.7 B. Редактор Atlas рассчитывает напряжения на затворе до 0,6 В. Следующий расчет (при 0,8 В) в первом приближении может не сойтись. Это происходит из-за того, что первое приближение было сформировано исходя из используемые подпороговые условия, что предыдущие напряжения равны 0,4 В и 0,6 В, а решение после порога будет нелинейным. Уменьшение шага смещения при расчете на 0,8 В сначала приведет к расчету на 0,7 В. Дальнейшие шаги будут снова проводиться с шагом 0,2 В.

5. ПРИМЕР РАСЧЕТА ВЫХОДНОЙ И ПЕРЕДАТОЧНОЙ ХАРАКТЕРИСТИК МОП ТРАНЗИСТОРА

a) Моделирование объемного n-канального MOSFET

MOSFET (от слов «металл-оксид-полупроводникуправляемый-полем», англ. metal-oxide-semiconductor field effect transistor) - полевых транзисторов с изолированным затвором.

В отличие от биполярных транзисторов, которые управляются током, транзисторы с изолированным затвором управляются напряжением, так как, по причине изолированного управляющего электрода (затвора) такие транзисторы обладают очень высоким входным сопротивлением.

На рис. 8 показана одна из возможных схем поперечного сечения n-канального объемного MOSFET с параметрами: длина канала L = 80 нм, толщина диэлектрика tox = 2 нм, глубина залегания перехода Xj = 30 нм, исток и сток n+ типа с равномерной концентрацией примеси 10^{20} см⁻³, подложка p-типа с концентрацией 10^{18} см⁻³. Для моделирования структуры воспользуемся САПР TCAD.

Пошаговый алгоритм моделирования:

1. Создание структуры прибора с использованием ATHENA/ATLAS/DEVEDIT.

1.1: simulator specification – определение используемого пакета для моделирования

1.2: mesh definition – задание сетки

- 1.3: region definition задание областей
- 1.4: electrode specification задание электродов
- 1.5: doping specification легирование

1.6: contact specification – задание контактов

2. Задание материалов для моделирования.

3. Задание методики расчета.

4. Получение предварительного расчета.

5. Запуск моделирования для получения расчетов при изменении параметров моделирования.

6. Вывод результатов на экран.



Рис. 8. Объемный п-канальный MOSFET

Программа для расчета объемного n-канального MOSFET

Программа для расчета объемного n-канального MOSFET

В редакторе DECKBUILD # обозначает комментарий, а не часть программы

Шаг 1: Создание структуры прибора

1.1 в каком приложении строим модель go atlas

1.2 задание сетки mesh space.mult=1.0 # задание сетки по оси х

loc обозначает местоположение и определяет положение линии сетки *x.mesh loc=0.00 spac=0.01*

spac означает шаг и определяет шаг сетки в заданной области x.mesh loc=0.05 spac=0.001 x.mesh loc=0.09 spac=0.004 x.mesh loc=0.13 spac=0.001 x.mesh loc=0.18 spac=0.01

задание сетки по оси у y.mesh loc=-0.002 spac=0.0005 y.mesh loc=0 spac=0.0004 y.mesh loc=0.03 spac=0.008 y.mesh loc=0.10 spac=0.01

1.3 задание областей прибора
region num=1 y.min=0 silicon
region num=2 y.max=0 oxide

1.4 задание электродов electrode name=gate number=1 x.min=0.05 x.max=0.13 top electrode name=source number=2 left length=0.05 y.min=0 y.max=0 electrode name=drain number=3 right length=0.05 y.min=0 y.max=0 electrode name=substrate number=4 bottom

1.5 определение степени легирования областей, распределение примеси постоянно с концентрацией conc=2e18 p.type region=1

doping uniform conc=2e18 p.type region=1

doping uniform conc=1e20 n.type x.left=0 x.right=0.05 y.min=0 y.max=0.03 doping uniform conc=1e20 n.type x.left=0.13 x.right=0.18 y.min=0 y.max=0.03

1.6 Определение контактов

n.poly задает n+ легированный поликремний как материал контакта с работой выхода workfuction=4.17eV contact name=gate n.poly contact name=source neutral contact name=drain neutral contact name=substrate neutral

#Шаг 2: Установка материалов модели *models mos print*

#Шаг 3: Определение особенностей модели при расчете (задание метода расчета) *method newton trap*

#Шаг 4: Задание начального приближения при нулевом смещении solve init

#Шаг 5: Запуск моделирования для получения графиков при разных смещениях затвора

#расчет нескольких кривых токов при изменении напряжения сток-исток

solve vdrain=0.1 outf=solve_vdrain1 solve vdrain=0.2 outf=solve_vdrain2 solve vdrain=0.3 outf=solve_vdrain3 solve vdrain=0.4 outf=solve vdrain4 # степень изменения напряжения на затворе на отдельных кривых ток стока от напряжения сток-исток *load infile=solve_vdrain1*

вывод результатов в специальный log файл log outf=gate1.log solve name=gate vgate=0 vfinal=1.2 vstep=0.1

load infile=solve_vdrain2 log outf=gate2.log solve name=gate vgate=0 vfinal=1.2 vstep=0.1

load infile=solve_vdrain3
log outf=gate3.log
solve name=gate vgate=0 vfinal=1.2 vstep=0.1

load infile=solve_vdrain4 log outf=gate4.log solve name=gate vgate=0 vfinal=1.2 vstep=0.1

#Шаг 6: Вывод результатов на экран # вывод всех log файлов на одном графике tonyplot -overlay gate1.log gate2.log gate3.log gate4.log quit

На рис. 9 показаны кривые зависимости I_d - V_{gs} MOSFET структуры при напряжениях сток-исток 0,1, 0,2, 0,3 и 0,4 В.



Рис. 9. Кривые I_d-V_{gs} (BAX) MOSFET структуры с L = 80 нм, tox = 2 нм

б) Тонкопленочный металлооксидный транзистор

В Atlas модуле моделируемого для прозрачного металлооксидного транзистора задавались основные параметры используемых материалов устанавливались И начальные приближения для расчета выходных передаточных И характеристик.

go atlas

mesh space.mult=1.0

x.mesh loc=0.0 spac=5 x.mesh loc=220.0 spac=5

y.mesh loc=-0.63 spac=5 y.mesh loc=-0.43 spac=1 y.mesh loc=-0.4 spac=1 y.mesh loc=-0.2 spac=10 y.mesh loc=0.0 spac=10 y.mesh loc=50.0 spac=10

Области транзистора нумеруются, им присваиваются соответствующие материалы и задается геометрия. Области, которые впоследствии будут определены как электроды, получают параметр «проводящий материал».

region num=1 material=oxide x.min=0 x.max=220 y.min=0 y.max=50 conductor region num=2 material= ITO x.min=0 x.max=220 y.min=-0.2 y.max=0region num=3 material=TiO2 x.min=0 x.max=220 y.min=-0.4 y.max=-0.2region num=4 material=ZnSnO x.min=0 x.max=220 y.min=-0.43 y.max=-0.4 semiconductor region num=5 material= ITO x.min=0 x.max=100 y.min=-0.63 y.max=-0.43 conductor region num=6 material= ITO x.min=6 x.max=220 y.min=-0.63 y.max=-0.43 conductor region num=7 material=air x.min=2 x.max=120 y.min=-0.63y.max=-0.43

В областях заданной геометрии определяются электроды затвора, истока, стока и подложки.

electrode num=1 name=gate y.min=-0.2 y.max=-0.0

electrode num=2 name=source x.min=0.0 x.max=100.0 y.min=-0.63 y.max=-0.43 electrode num=3 name=drain x.min=120.0 x.max=220.0 y.min=-0.63 y.max=-0.43 electrode num=4 name=subatrate y.min=0 y.max=50.0

Для канала задается степень и тип легирования.

doping uniform concentration=1e16 n.type y.min=-0.43 y.max=-0.4

После задания стандартных (TiO₂) и пользовательских (ZnSnO) материалов, а также определения степени легирования канала, устанавливаются их основные электрофизические параметры.

material material=TiO2 permittivity=10 material material=ZnSnO permittivity=18 mun=120

struct outf=tft.str
tonyplot tft.str

САПР ТСАД Физические модели В залаются с использованием параметров MODELS и IMPACT. Физические модели могут быть сгруппированы в 5 классов: подвижности, рекомбинации, статистики носителей заряда, ударной ионизации и туннелирования. Параметры модели можно задавать для определенного материала. В случае приборов, работающих на нестандартных материалах, параметры моделей должны задаваться только после их анализа.

models FERMI TASCH SRH temp=300 print

Стандартным для расчета полевых транзисторов берется метод Ньютона.

method newton itlimit=25 trap atrap=0.5 maxtrap=4 autonr

Моделирование выходных характеристик:

solve init solve vdrain=0.01 solve vdrain=0.02 solve vdrain=0.1

solve vgate=1.0 outf=solve_vgate1 solve vgate=2.0 outf=solve_vgate2 solve vgate=3.0 outf=solve_vgate3 solve vgate=4.0 outf=solve_vgate4 solve vgate=5.0 outf=solve_vgate5 solve vgate=6.0 outf=solve_vgate6 solve vgate=7.0 outf=solve_vgate7 solve vgate=8.0 outf=solve_vgate8 solve vgate=9.0 outf=solve_vgate9 solve vgate=10.0 outf=solve_vgate10

load infile=solve_vgate1
log outf=tft1.log
solve name=drain vdrain=0 vfinal=10 vstep=0.5

load infile=solve_vgate2 log outf=tft2.log solve name=drain vdrain=0 vfinal=10 vstep=0.5

```
load infile=solve_vgate3
log outf=tft3.log
solve name=drain vdrain=0 vfinal=10 vstep=0.5
```

```
load infile=solve_vgate4
```

log outf=tft4.log solve name=drain vdrain=0 vfinal=10 vstep=0.5

load infile=solve_vgate5
log outf=tft5.log
solve name=drain vdrain=0 vfinal=10 vstep=0.5

```
load infile=solve_vgate6
log outf=tft6.log
solve name=drain vdrain=0 vfinal=10 vstep=0.5
```

load infile=solve_vgate7 log outf=tft7.log solve name=drain vdrain=0 vfinal=10 vstep=0.5

load infile=solve_vgate8 log outf=tft8.log solve name=drain vdrain=0 vfinal=10 vstep=0.5

load infile=solve_vgate9
log outf=tft9.log
solve name=drain vdrain=0 vfinal=10 vstep=0.5

load infile=solve_vgate10 log outf=tft10.log solve name=drain vdrain=0 vfinal=10 vstep=0.5

tonyplot -overlay tft1.log tft2.log tft3.log tft4.log tft5.log tft6.log tft7.log tft8.log tft9.log tft10.log log off

Моделирование передаточных характеристик:

solve init

```
solve vdrain=0.1 outf=solve_vdrain1
solve vdrain=0.5 outf=solve_vdrain2
solve vdrain=1.0 outf=solve_vdrain3
solve vdrain=2.0 outf=solve_vdrain4
```

load infile=solve_vdrain1
log outf=gate1.log
solve name=gate vgate=0 vfinal=10 vstep=0.5

```
load infile=solve_vdrain2
log outf=gate2.log
solve name=gate vgate=0 vfinal=10 vstep=0.5
```

```
load infile=solve_vdrain3
log outf=gate3.log
solve name=gate vgate=0 vfinal=10 vstep=0.5
```

```
load infile=solve_vdrain4
log outf=gate4.log
solve name=gate vgate=0 vfinal=10 vstep=0.5
```

tonyplot -overlay gate1.log gate2.log gate3.log gate4.log

quit



Рис. 10. Структура прозрачного металлооксидного транзистора, построенная в модуле Atlas; штриховые линии – шаг сетки моделирования; электроды – объемные области истока, стока, затвора и подложки



Рис. 11. Выходные характеристики смоделированного прозрачного металлооксидного транзистора



Рис. 12. Передаточные характеристики смоделированного прозрачного металлооксидного транзистора
6. ЗАДАНИЯ НА ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

Задание 1.

Эпитаксиально-планарная структура со скрытым n+ слоем



Задание 2.

Структура с диэлектрической изоляцией



Задание 3.

Диффузионно-планарная структура



Задание 4.

Эпитаксиально-планарная структура



Задание 5.



Задание 6.



Задание 7.





Задание 8.



Задание 9.



Задание 10.

КМДП КНС-структура



Задание 11.



Задание 12.

МДП транзистор со встроенным каналом n-типа



Задание 13.

МОП транзистор с каналом n-типа и затвором из поли-Si



Задание 14.



Задание 15.

МДП транзистор с каналом р-типа



Задание 16.



БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Технология СБИС: в 2-х кн. пер. с англ./Под ред. С.Зи. – М.: Мир, 1986. Кн.1. – 404 с., ил.

2. Технология СБИС: В 2-х кн. пер. с англ./Под ред. С.Зи. – М.: Мир, 1986. Кн.2.– 453 с., ил.

3. Технология полупроводниковых приборов и изделий микроэлектроники. В 10 кн.: учебник для ПТУ. Кн. 1. Общая технология / И.Я. Козырь, Ю.И. Горбунов и др. – М.: Высш. шк., 1989. – 223 с., ил.

4. Athena User's Manual. Silvaco, Inc. 4701 Patrick Henry Drive, Bldg. 2 September 4, 2013, Santa Clara, CA 95054, 438 c.

5. Atlas User's Manual DEVICE SIMULATION SOFTWARE. Silvaco, Inc. 4701 Patrick Henry Drive, Bldg. 2 January 30, 2015, Santa Clara, CA 95054, 1669 c.

6. DeckBuild User's Manual. Silvaco, Inc.4701 Patrick Henry Drive, Bldg. 2 January 30, 2015, Santa Clara, CA 95054, 220c.

оглавление

Введение. Синтаксис редактора Atlas							
1.	Опера	торы и параметры					
	Список команд Atlas						
2.	Задани	ие структуры прибора	5				
	2.1.	Использование команд Athena					
	2.2.	Использование команд DevEdit					
	2.3.	Использование языка для задания структуры					
	2.3.1. Определение начальных настроек сетки прибора2.3.2. Задание областей и материалов						
		2.3.3. Работа в цилиндрических координатах	10				
	2.3.4. Задание электродов						
		2.3.5. Задание профиля легирования областей					
	2.4. meshin	2.3.6. Аналитические профили легирования					
		2.3.7. Импорт профилей легирования 1D SSUPREM3	из 15				
(Auto-		Автоматическая настройка се g)	тки 16				
		2.4.1. Задание сетки и областей	16				
		2.4.2. Новые подходы к работе в TCAD	17				
		2.4.3. Неравномерная настройка координат се по оси X и автомасштабирование сетки	тки 19				
		2.4.4. Определение состава легируют примеси	цей 23				
		2.4.5. Сверхрешетки и распределёни брэгговские отражатели (DBR)	ные 24				
файла	2.5.	Изменение областей, заданных из сторонн	его 26				

програ	2.6. ммиро	Перенаю вания	стройка с	сетки	с ис	пользов	занием	языка 26
	Ĩ	2.6.1 I области	Теренастро	ойка	сетк	и на	легир	уемой 27
		2.6.2. I рассчит	Теренастро анных пер	ойка (ременні	сетки ых	сис	СПОЛЬЗОВ	анием 28
		2.6.3. (моделиј	Основные рования	попра	авки	к нас	тройке	сетки 28
	2.7.	Задание	е областей	четыре	ехуго	льной ф	ормы	29
3.	Опред	еление г	араметров	в матер	иало	в и моде	елей	30
Работа	3.1. 1 выход	Задание а затвор	е параме ра и контак	тров тов Ше	конт оттки	актов	(CONT	ACT). 30
		3.1.1. З электро	Задание дами по то	пар эку	амет	ров	упран	вления 31
		3.1.2. З конденс	Задание саторов и 1	ві индукті	нешн ивнос	их стей	резис	торов, 32
		3.1.3. I	Тлавающи	е конта	акты			32
		3.1.4. 3	Закорачива	ание дв	ух ко	нтактов	3	33
		3.1.5. И цепи	Изготовлен	ние	конт	акта	разомн	хнутой 35
	3.2.	Настроі	йка свойст	в матер	риало	В		36
		3.2.1. I проводн	Толупровс ники	дники,		диэлен	ктрики	и 36
		3.2.2. 3	Вадание па	раметр	OB			36
		3.2.3. I	Сетеропере	еходны	е мат	ериалы		37
	3.3.	Опреде:	ление пара	аметров	з гран	ниц обла	астей	38
	3.4.	Настроі	йка физиче	еских м	юдел	ей		38
		3.4.1. N	Модель эн	ергетич	еско	го балан	нса	40
		3.4.2.	Сводные та	аблицы	по м	оделям		41

TCAD	3.5.	Настро	ойки	методов	расчета	структур) В	Silvaco 46
		3.5.1.	Расче	ет диффуз	ионно-др	ейфовой	мод	ели 47
	 3.5.2. Расчет диффузионно-дрейфовой п учетом тепловых воздействий на кристал решетку 3.5.3. Расчет энергетического баланса 							одели с ческую 48
								48
	3.5.4. Расчет энергетического баланса с у тепловых воздействий на кристаллич решетку						учетом ческую 49	
		3.5.5.	Задан	ние числа	носителе	й заряда		49
		3.5.6.	Пара	метры ко	манды М	ETHOD		50
4.	Расчет	характ	ерист	гик				51
	4.1.	Решения на постоянном токе						
	4.2.	Задание смещения						52
	4.3. Создание семейства кривых						52	
	4.4.	Необхо	одимо	ость	задани	Я	нача	ального
приближения							54	
	4.5.	Начало расчета						
	4.6. Первый и второй ненулевые расчеты							55
	4.7.	Задани	ie o	становки	метода	при	отс	утствии
сходим	лости							56
5. моп тр	. Пример расчета выходной и передаточной характеристи оп транзистора 5							еристик 58
6.	Задания на лабораторные работы 7							72
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК 7							77	

Учебное издание

Арсентьев Алексей Владимирович Плотникова Екатерина Юрьевна

МЕТОДЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ: ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

В авторской редакции

Компьютерная верстка Е.Ю. Плотниковой

Подписано к изданию 15.12.2016.

Объем данных 2,3 Мб

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

394026 Воронеж, Московский просп., 14