

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Кафедра микро- и наноэлектроники

М. Н. НАЙБУК, В. В. НЕЛАЕВ

**ПРОГРАММНЫЙ МОДУЛЬ GUI-SUPREM III
ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ**

МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

по дисциплине «Основы САПР в микроэлектронике»
для студентов специальностей

I-41 01 02 «Микро- и наноэлектронные технологии и системы»,
I-41 01 03 «Квантовые информационные системы»
дневной, заочной и дистанционной форм обучения

Минск 2007

УДК 621.382.8.049.77(075.8)

ББК 32.844.1 я 73

Н 49

Рецензент

канд. техн. наук, проф. Н. С. Образцов

Нелаев В.В

Н 49 Программный модуль GUI-SUPREM III для проектирования технологии интегральных схем: метод. пособие по дисц. «Основы САПР в микроэлектронике» для студ. спец. I-41 01 02 «Микро- и нанозлектронные технологии и системы», I-41 01 03 «Квантовые информационные системы» днев., заоч. и дистанц. форм обуч. / М.Н. Найбук, В.В. Нелаев. – Минск.: БГУИР, 2007. – 43 с. : ил.

ISBN 978-985-488-185-0

В пособии приведены общие сведения о программном комплексе SUPREM III для компьютерного моделирования и проектирования технологии изготовления интегральных микросхем. Описываются физические модели технологических операций микроэлектроники, используемые в программном комплексе SUPREM III, и порядок работы в среде модуля GUI-SUPREM III. Содержится подробное описание директив на выполнение моделирования и представлен пример моделирования технологии формирования структуры биполярного p-p-n транзистора. Модуль GUI-SUPREM III может использоваться в локальной компьютерной сети, а также в глобальной сети Интернет в составе специализированного программно-аппаратного комплекса.

УДК 621.382.8.049.77(075.8)

ББК 32.844.1 я 73

ISBN 978-985-488-185-0

© Найбук, М. Н., Нелаев, В. В., 2007

© УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», 2007

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ, В ПРОГРАММЕ SUPREM III	5
1.1. Модели ионной имплантации	5
1.2. Модели диффузии легирующих примесей.....	5
1.3. Модель окисления	6
1.4. Модель эпитаксии	6
1.5. Модели осаждения и травления.....	7
1.6. Расчет электрических характеристик моделируемой приборной структуры.....	7
2. ОПИСАНИЕ ПРОГРАММНОГО МОДУЛЯ GUI-SUPREM III	8
2.1. Основные характеристики модуля GUI-SUPREM III.....	8
2.2. Работа в среде модуля GUI-SUPREM III.....	8
2.3. Формирование входного файла с заданием на моделирование	10
2.3.1. Задание параметров исходной подложки и расчетной сетки.....	10
2.3.2. Задание параметров директивы на моделирование процесса ионной имплантации	14
2.3.3. Задание параметров директивы на моделирование процесса диффузии примесей.....	16
2.3.4. Задание параметров на моделирование процесса осаждения	21
2.3.5. Задание параметров на моделирование процесса травления	23
2.3.6. Задание параметров на моделирование процесса эпитаксии	23
3. ДИРЕКТИВЫ ПРОГРАММЫ SUPREM III.....	26
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.....	32
ЛИТЕРАТУРА.....	33
ПРИЛОЖЕНИЕ. Пример моделирования технологии формирования структуры биполярного n-p-n транзистора и его электрических характеристик с использованием модуля GUI-SUPREM III	35

ВВЕДЕНИЕ

Компьютерное моделирование и проектирование в микроэлектронике, включая всю совокупность этапов проектирования технологии/прибора/схемы, является основой развивающейся в настоящее время концепции виртуального производства или виртуальной фабрики (Virtual Wafer Fabrics, VWF). Системы компьютерного проектирования технологии (Technology Computer Aided Design, TCAD) – важные составные части VWF [1].

Ознакомление и приобретение навыков работы в среде TCAD необходимые компоненты подготовки и повышения квалификации инженеров-проектировщиков интегральных микросхем (ИМС).

Наиболее популярные в мире программные комплексы для проектирования технологии в микроэлектронике – программы ряда SUPREM (Stanford University PRogram Emphasized on technology Modeling): SUPREM II [2-3], SUPREM III, SSUPREM3 [4], SSUPREM4 [5]. Программный комплекс SSUPREM4 (последний в линейке SUPREM) входит в состав модуля проектирования технологии ATHENA, разработчиком которой является компания Silvaco [6]. Стоимость лицензии на использование коммерческих программных комплексов SSUPREM3 и SSUPREM4 составляет сотни тысяч долларов.

Программный модуль GUI (Graphical User Interface)-SUPREM III является оболочкой свободно распространяемого программного средства для моделирования технологии изготовления ИМС SUPREM III. Программный комплекс SUPREM III предназначен для одномерного по пространству физического моделирования отдельных операций и технологического маршрута в целом по изготовлению кремниевых приборов микроэлектроники. Программный комплекс SUPREM III позволяет осуществлять физическое моделирование базовых технологических операций, включая диффузионное и имплантационное легирование, диффузионное перераспределение примесей, окисление, эпитаксию, травление.

Модуль GUI-SUPREM III предназначен как для ознакомления с современными системами компьютерного моделирования технологических процессов микроэлектроники, так и для проведения реального моделирования и проектирования технологического маршрута изготовления ИМС. Важной особенностью модуля является возможность расчета в его среде электрических характеристик структурных элементов прибора с использованием в качестве входных данных (геометрия структуры и распределение концентрации примесей в ее элементах) результатов моделирования технологии, что позволяет проводить замкнутый цикл моделирования технологии/прибора.

Модуль GUI-SUPREM III может использоваться в локальной компьютерной сети, а также в глобальной сети Интернет в составе специализированного программно-аппаратного комплекса [7–9].

1. ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ, В ПРОГРАММЕ SUPREM III

1.1. Модели ионной имплантации

В программном комплексе SUPREM III используются аналитическое и численное приближения для построения профиля распределения ионно-имплантированных примесей. Аналитические модели основаны на построении профилей с использованием стандартных статистических функций распределения с параметрами – рассчитанными или измеренными моментами. В численном подходе решается кинетическое уравнение Больцмана.

В аналитическом приближении концентрационный профиль ионно-имплантированных примесей строится посредством использования гауссова статистического распределения (для мышьяка и фосфора) и статистической функции PEARSON IV (для бора) с экспоненциальным «хвостом», описывающим эффект каналирования. При этом учитывается кристаллографическая ориентация исходной подложки. Параметры имплантации – доза и энергия имплантируемых примесей.

1.2. Модели диффузии легирующих примесей

Модели диффузии в программном комплексе SUPREM III описывают перераспределение примесей и дефектов кристаллографической решетки при термической обработке, обусловленное градиентом концентрации и внутренними электрическими полями.

Математическая формулировка физической модели процесса диффузии представляет собой уравнение непрерывности, описывающее временной баланс дефектно-примесной системы, а также образование и распад комплексов атомов примеси в случае наличия в ней мышьяка. Коэффициенты диффузии примесей определяются собственным коэффициентом диффузии с добавкой в эмпирической форме, учитывающей эффект электрического поля другой примеси. При расчете коэффициента диффузии фосфора учитываются также: эффект повышенной концентрации вакансий, вызванный как радиационными повреждениями кристаллической решетки кремния в процессе имплантации высокоэнергетических ионов, так и распадом пар «точечный дефект (вакансия или междоузлие) – примесный атом», и эффект высокого уровня концентрации точечных дефектов вблизи поверхности кремниевой подложки.

При моделировании диффузии примесей учитываются, кроме того:

- уровень и эволюция в пространстве и времени концентрации точечных дефектов кристаллической решетки;
- зависимость коэффициентов диффузии примесей от температуры и от уровня концентрации примесей;
- эффект кластерообразования и распада комплексов примесных атомов (для мышьяка);

- дрейф ионов примеси в электрическом поле других заряженных примесей;
- эффект повышенной концентрации вакансий при моделировании диффузии фосфора;
- эффекты, связанные со взаимодействием атомов примесей с пространственными дефектами кристаллической решетки (дислокациями, границами зерен, дефектами упаковки и др.).

1.3. Модель окисления

При изготовлении приборов микроэлектроники важным технологическим процессом является термическое окисление, используемое при формировании областей изоляции, маски (для осуществления легирования примесей), а также подзатворного диэлектрика в МОП-структурах. Следует отметить, что строгий контроль толщины подзатворного диэлектрика (двуокись кремния) имеет особенное значение по мере перехода к субмикронным размерам элементов приборов.

Математическая формулировка физической модели процесса роста окисной пленки на кремниевой подложке основана на линейно-параболическом представлении Дила–Гроува. Процесс диффузии примесей через поверхность раздела «кремний/двуокись кремния» моделируется с учетом эффекта повышения диффузии примесей при окислении в условиях неподвижной и движущейся границы раздела. При моделировании скорости роста окисной пленки учитываются состав и парциальные давления компонентов окислительной среды.

Моделирование диффузии примесей при термическом окислении основано на представлении «локальных» эффектов, связанных с локальной концентрацией примесей, определяющей положение уровня Ферми, и дальнедействующих эффектов, обусловленных окислением на границе раздела «кремний/двуокись кремния», а также образованием и распадом комплексов «дефект–атом примеси» при окислении.

1.4. Модель эпитаксии

Эпитаксия – процесс модификации поверхности, широко используемый в современной полупроводниковой технологии. Как и в случае роста окисной пленки, моделирование процесса эпитаксии в математической постановке представляет собой численное решение задачи диффузии с движущейся границей.

Автолегирование эпитаксиальной пленки при ее росте из легированной подложки рассчитывается посредством решения уравнения второго закона Фика с соответствующими граничными условиями.

1.5. Модели осаждения и травления

При моделировании осаждения и травления используются простые геометрические представления с учетом:

- размера зерна при осаждении поликремния;
- кристаллографической ориентации кремниевой подложки.

Более подробное описание физических моделей технологических операций микроэлектроники, используемые в программном комплексе SUPREM III, содержится в работах [4–5].

1.6. Расчет электрических характеристик моделируемой приборной структуры

В составе программного комплекса SUPREM III возможно проведение расчетов основных электрических характеристик моделируемой приборной структуры – удельной проводимости (conductivity) и сопротивления слоя (sheet resistance). При этом входными параметрами для расчета электрических характеристик являются результаты моделирования технологии (геометрия структуры и распределение концентрации примесей в ее элементах), что позволяет проводить замкнутый цикл моделирования технологии/прибора.

Указанные электрические характеристики рассчитываются на основании численного решения уравнения Пуассона, описывающего распределение носителей заряда в одномерной моделируемой структуре с соответствующими начальными и граничными условиями:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\epsilon_0 \epsilon \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) = q \cdot (N_A - N_D + n + p), \quad (1.1)$$

где ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость в вакууме;

ϵ – диэлектрическая проницаемость кремния;

ψ – электростатический потенциал;

q – элементарный заряд;

N_A – концентрация ионизированных акцепторных примесей;

N_D – концентрация ионизированных донорных примесей;

n – концентрация электронов;

p – концентрация дырок.

Сопротивление слоя описывается выражением

$$r_S = \frac{1}{q \int_0^{x_j} [n(x) - N_{D,A}] m[n(x)] dx}, \quad (1.2)$$

где m – подвижность основных носителей (электронов или дырок).

2. ОПИСАНИЕ ПРОГРАММНОГО МОДУЛЯ GUI-SUPREM III

2.1. Основные характеристики модуля GUI-SUPREM III

Модуль GUI-SUPREM III представляет собой программное средство, предназначенное для одномерного по пространству моделирования и проектирования технологии изготовления интегральных схем как в локальной сети, так и в составе специализированного аппаратно-программного комплекса – в глобальной сети Интернет. Ядром модуля GUI-SUPREM III является свободно распространяемый программный комплекс SUPREM III – аналог коммерческого программного комплекса SSuprem3, который входит в состав модуля ATHENA программного комплекса компании Silvaco.

Графическая оболочка модуля разработана на объектно-ориентированном языке программирования JAVA.

Модуль GUI-SUPREM III функционирует в операционной системе (ОС) Linux Slackware, в том числе в ОС Live CD дистрибутива Linux.

Технические требования к работе в среде модуля GUI-SUPREM III:

- оперативная память компьютера, не менее 128 Мбайт;
- процессор производительностью не ниже, чем Intel Pentium II;
- привод компакт дисков CD-ROM 32x.

2.2. Работа в среде модуля GUI-SUPREM III

Стандартный запуск модуля GUI-SUPREM III осуществляется с использованием самозагрузочного компакт-диска Linux LiveCD Slax с установленным на нем модулем. Для инсталляции GUI-SUPREM III необходимо произвести следующие действия:

1. В BIOS'е компьютера устанавливается параметр, предоставляющий возможность загрузки системы с привода компакт - диска;
2. Для входа в ОС Linux Slax вводятся login (root), пароль (toor) и затем UNIX-команда `guifast`;
3. Запуск модуля осуществляется нажатием в меню Linux Slax кнопки TCAD/GUI-SUPREM III.

На рис. 2.1. представлено главное окно модуля GUI-SUPREM III с выделенными в нем четырьмя областями: стандартное меню (Files, Commands, Help), панель инструментов, область для ввода входных параметров в файле задания на моделирование, область отображения результатов моделирования в табличном виде.

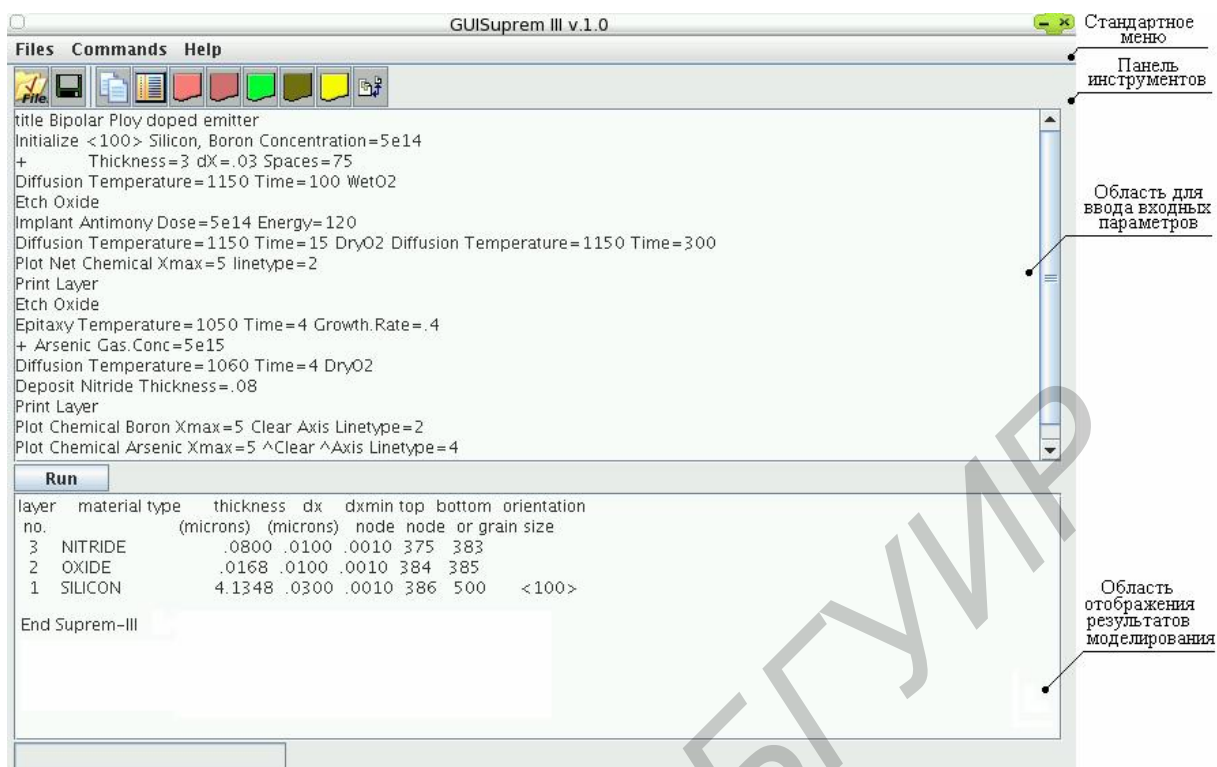












Рис. 2.1. Главное окно модуля GUI-SUPREM III

Описание кнопок панели инструментов представлено в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Кнопки панели инструментов GUI-SUPREM III

	Открытие содержания файла
	Сохранение содержания текстовой области в файле
	Создание новой области для формирования файла с заданием на моделирование
	Открытие окна для задания параметров исходной подложки и расчетной сетки
	Открытие окна для задания параметров на моделирование процесса имплантации
	Открытие окна для задания параметров на моделирование процесса диффузии
	Открытие окна для задания параметров на моделирование процесса осаждения
	Открытие окна для задания параметров на моделирование процесса травления
	Открытие окна для задания параметров на моделирование процесса эпитаксии
	Открытие окна для задания параметров вывода результатов моделирования
Run	Запуск процесса моделирования

В среде модуля GUI-SUPREM III имеются файлы с примерами моделирования. Для доступа к примерам следует открыть меню Files и выбрать команду Open. После этого появится окно, представленное на рис. 2.2, в котором при выборе директивы Examples будет показан список примеров. Выберите один из них, применив команду Open.

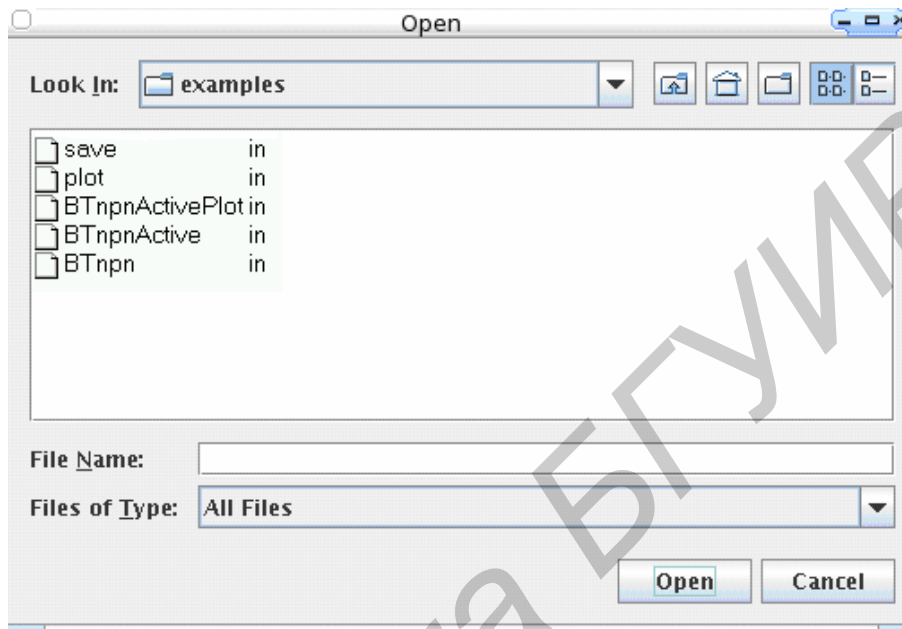



Рис. 2.2. Окно Open для загрузки файлов с примерами

2.3. Формирование входного файла с заданием на моделирование

2.3.1. Задание параметров исходной подложки и расчетной сетки

Для задания параметров исходной подложки и расчетной сетки выберите в стандартном меню GUI-SUPREM III пункт Commands → Initialize (инициализация параметров, характеризующих состояние исходной кремниевой подложки). В результате откроется окно для ввода параметров подложки и расчетной сетки (рис. 2.3). Это окно можно открыть и нажатием кнопки .

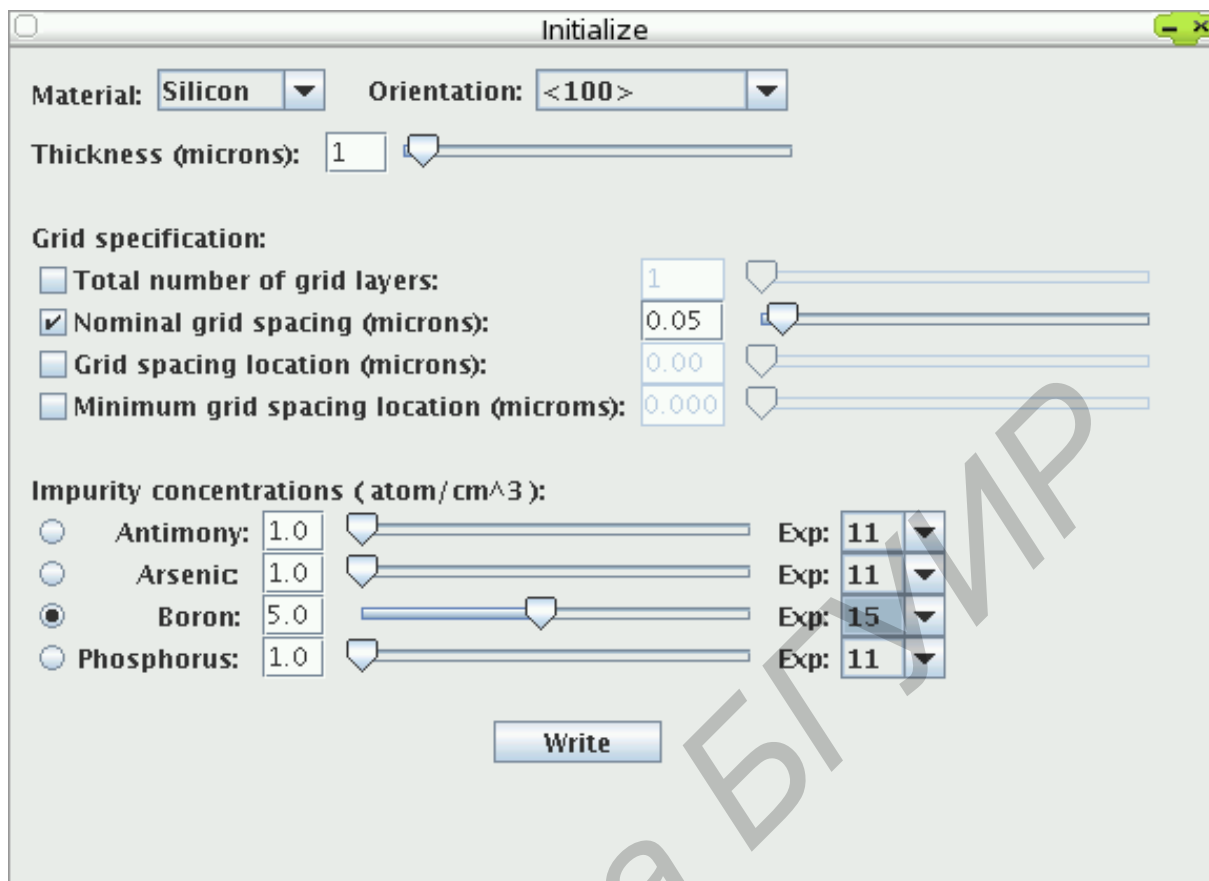


Рис. 2.3. Окно Initialize для задания параметров исходной подложки и расчетной сетки

Задание расчетной сетки. Решение уравнений, описывающих модели технологических операций в SUPREM III, осуществляется численно. В связи с этим важное значение имеет выбор оптимальных (с точки зрения точности расчетов) параметров расчетной сетки.

Для организации простой равномерной сетки следует установить размер моделируемой области Thickness и значение шага расчетной сетки (Nominal grid spacing, DX). Количество узлов SPACES в моделируемой области рассчитывается автоматически.

На рис. 2.3 в качестве примера приведено окно с необходимыми параметрами для организации равномерной расчетной сетки, а на рис. 2.4 – результат этой процедуры. Здесь размер моделируемой области Thickness выбран равным 1 мкм, а шаг сетки (Nominal grid spacing, DX) равен 0,05 мкм, так что полное количество узлов в моделируемой области равно 20.

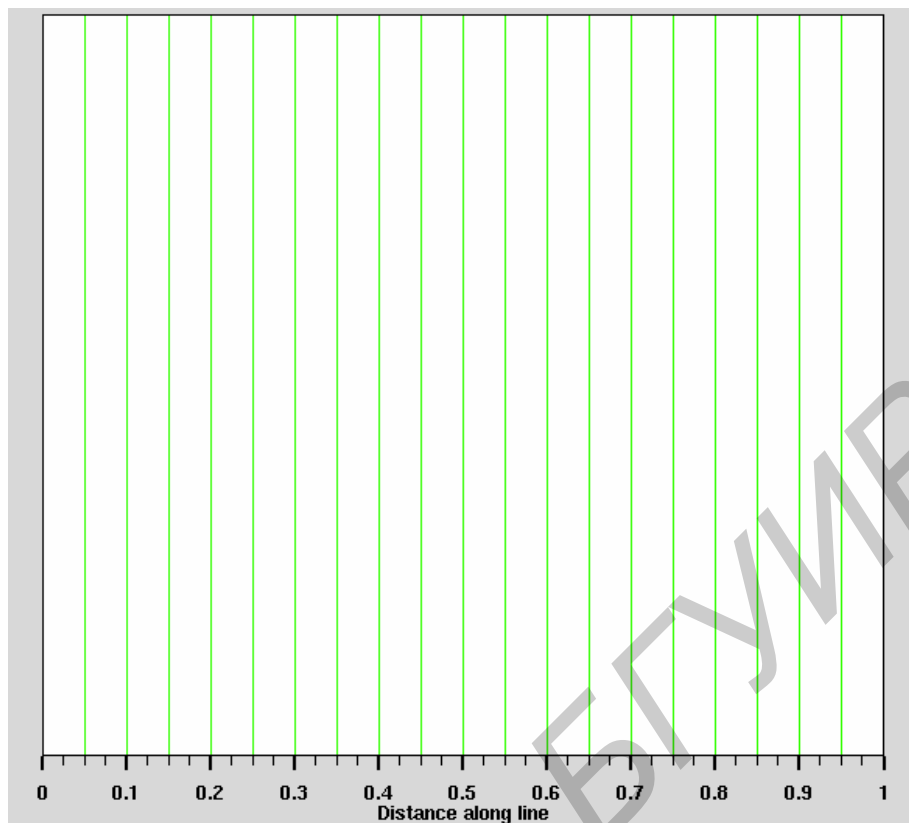


Рис. 2.4. Равномерная сетка в одномерном пространстве

Если концентрации примесей в моделируемой области изменяется в широком диапазоне, то для достижения приемлемой точности расчетов необходимо использовать неравномерную сетку: в области высоких концентраций шаг сетки должен быть меньше, чем в области низких концентраций.

Например, в результате ионной имплантации бора с энергией 60 кэВ максимум его концентрации располагается вблизи 0,2 мкм. Разумно в этой части моделируемой области использовать более мелкую расчетную сетку. С этой целью следует ввести параметр *Grid spacing location, XDX*, устанавливающий координату, вблизи которой шаг сетки устанавливается более мелким. Для данного примера этот параметр равен 0,2 мкм. Величина шага расчетной сетки в этой области устанавливается с помощью параметра *Nominal grid spacing, DX*, равного, например, 0,01 мкм. Если задано общее число узлов расчетной сетки *Total number of grid layers, SPACES*, например 20, то шаг сетки во всей моделируемой области рассчитывается автоматически.

В результате расчетная сетка, показанная на рис. 2.5.

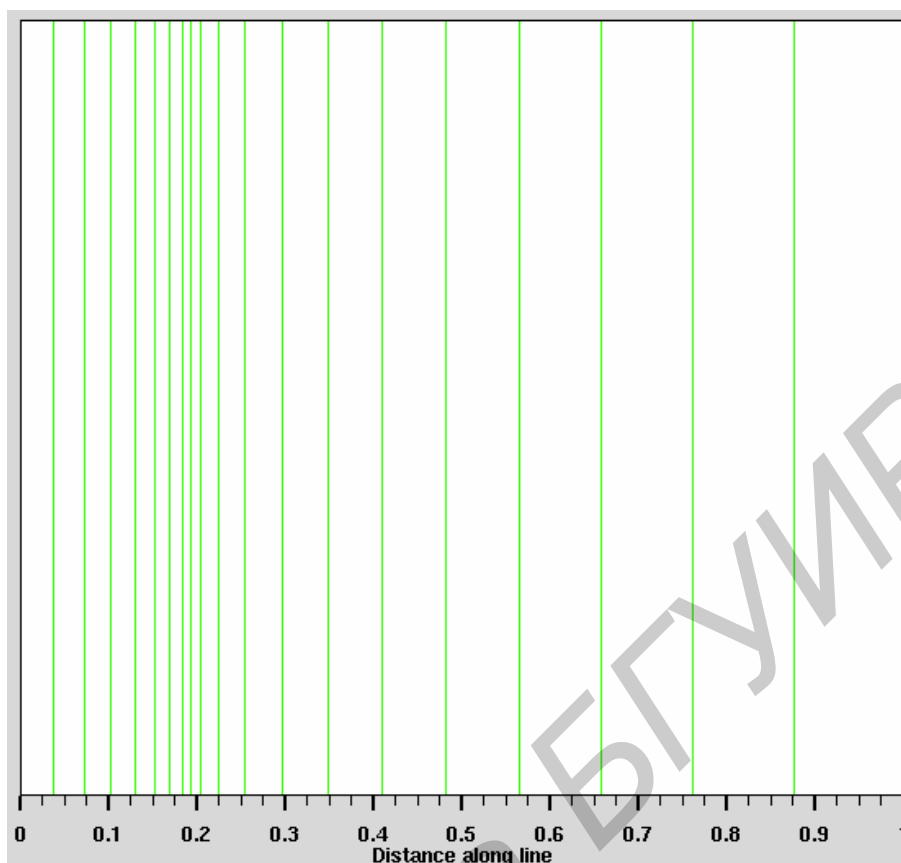


Рис. 2.5. Неравномерная расчетная сетка

Задание параметров исходной подложки. Параметрами исходного состояния подложки являются:

- материал подложки (кремний);
- кристаллографическая ориентация кремния $\langle 100 \rangle$, $\langle 111 \rangle$ или $\langle 110 \rangle$;
- тип легирующей примеси и ее концентрация, если подложка изначально легирована.

На рис. 2.3 показано, что исходная кремниевая (Silicon) подложка имеет кристаллографическую ориентацию (Orientation) $\langle 100 \rangle$ и легирована бором (Boron) с концентрацией $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$.

После определения всех необходимых для исходной подложки и расчетной сетки параметров нажимаем кнопку Write, и в окне области для ввода входных параметров модуля GUI-SUPREM III будет записана следующая директива, описывающая параметры исходной подложки и расчетной сетки:

```
INITIALIZE SILICON <100>, B CONC=5.0E14 THICK=1 DX=0.05
```

Для графической визуализации профиля распределения концентрации примеси используется директива PLOT. Подробное описание этой директивы представлено в подразде. 2.3.7. Здесь и далее в качестве примера будет

применятся директива PLOT без дополнительных объяснений использованных в ней параметров.

```
PLOT CHEMICAL BORON XMAX=3 CMAX=1E21 CLEAR AXIS  
+ LINETYPE=2
```

Нажатием кнопки Run в главном окне модуля GUI-SUPREM III (см. рис. 2.1) получим распределение концентрации бора в кремниевой подложке для выбранного примера (рис. 2.6).

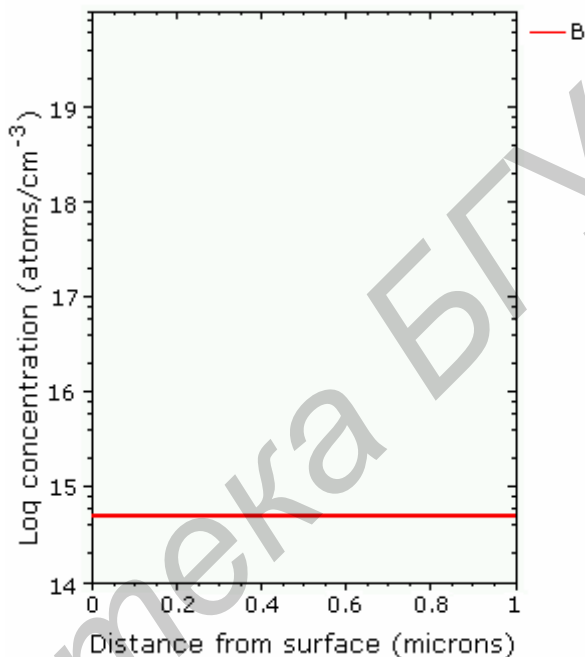



Рис. 2.6. Распределение концентрации бора в исходной подложке (равномерная сетка)

2.3.2. Задание параметров директивы на моделирование процесса ионной имплантации

Моделирование процесса ионной имплантации в программе SUPREM III осуществляется по директиве IMPLANT. Для задания параметров директивы IMPLANT выберите последовательно опции стандартного меню Commands → Implant. После этого откроется окно, представленное на рис. 2.7. Это окно можно открыть и нажатием красной кнопки .

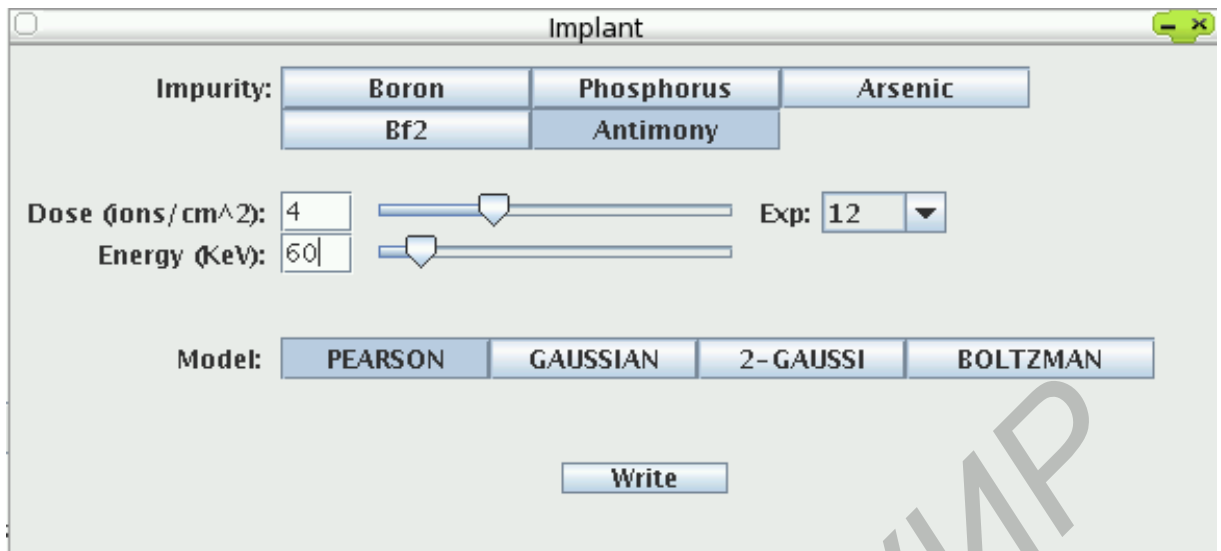


Рис. 2.7 Окно Implant для задания параметров на моделирование процесса ионной имплантации

Минимальный набор параметров директивы IMPLANT:

- тип имплантируемой примеси (бор, фосфор, мышьяк, BF_2 или сурьма);
- доза имплантации (задается с помощью слайдера: вначале выбирается значение предэкспоненциального множителя, например 4, а затем, используя опцию Exp menu, показатель экспоненты, например 12);
- энергия имплантации в кэВ (например 60);
- метод построения профиля распределения имплантированной примеси: посредством использования статистических функций распределения (PEARSON IV, гауссиана, сдвоенная гауссиана) или расчет посредством численного решения транспортного уравнения Больцмана.

После нажатия кнопки Write в окне области для ввода входных параметров будет записана директива на проведение моделирования имплантации.

Например:

```
IMPLANT AN DOSE=4E12 ENERGY=60 PEARSON
```

Используя следующие директивы:

```
INITIALIZE SILICON <100>,B CONC=5.0E14 THICK=1 DX=0.01
IMPLANT AN DOSE=4E14 ENERGY=80 PEARSON
PLOT CHEMICAL BORON XMAX=0.2 CMAX=2E20 CLEAR AXIS
+ LINETYPE=2
PLOT CHEMICAL AN XMAX=0.2 CMAX=2E20 ^CLEAR ^AXIS
+ LINETYPE=3
```

получим распределения концентрации бора (Boron) и имплантированной сурьмы (Antimony) (рис. 2.8).

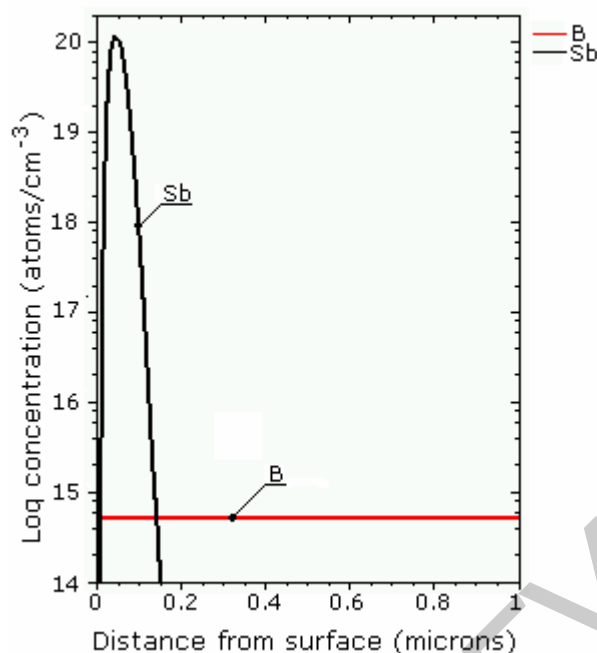



Рис. 2.8. Распределение концентрации бора и сурьмы в кремневой подложке после имплантации

2.3.3. Задание параметров директивы на моделирование процесса диффузии примесей

Моделирование процесса диффузионного перераспределения примесей осуществляется по директиве DIFFUSION. Для задания параметров директивы DIFFUSION выберите последовательно опции стандартного меню: Commands→Diffusion. После этого откроется окно, представленное на рис. 2.9. Это окно можно открыть и нажатием бордовой кнопки .

В окне Diffusion имеется три области (поля). Вначале доступны только поля Time/Temperature и Ambient. Поле Impurities появляется только в том случае, если будет включена соответствующая опция.

В программе SUPREM III имеется несколько моделей высокотемпературного перераспределения примесей, которые запускаются по директиве

DIFFUSION с соответствующими параметрами:

- модель термического отжига в инертной среде;
- модель окисления кремния с одновременным перераспределением примесей, как в кремниевой подложке, так и в растущем окисле;
- модель диффузионного легирования из неограниченного источника;
- модель загонки примеси из твердого раствора.

Для формирования директивы на моделирование *термического отжига в инертной среде* необходимо задать следующие параметры в директиве DIFFUSION:

- длительность (Time) высокотемпературной обработки (например 60 мин);
- температура (Temperature) (например 1100 °C);
- среда (Ambient) отжига.

На рис. 2.9 показан пример задания параметров на моделирование диффузионного перераспределения примесей при температуре 1100 °C длительностью 60 мин. в инертной среде (азот).

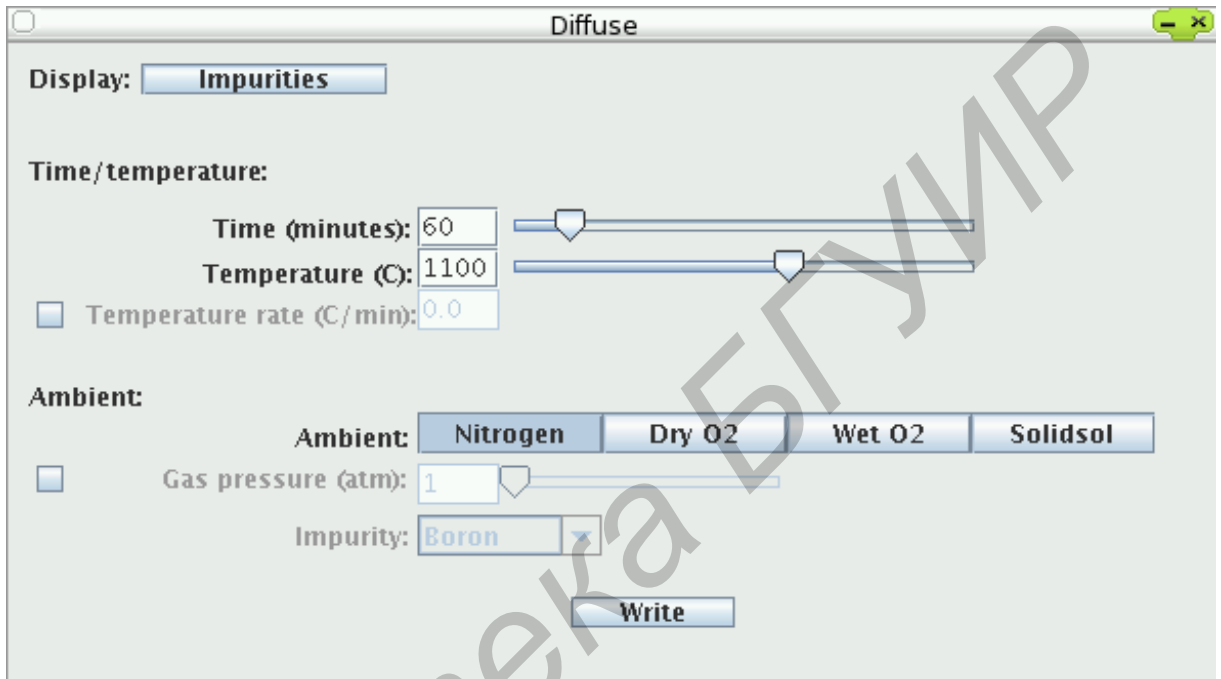


Рис. 2.9. Окно Diffuse для задания параметров на моделирование высокотемпературного диффузионного перераспределения примесей

После нажатия кнопки Write в окне области для ввода входных параметров будет записана следующая директива:

```
DIFFUSION TIME=60 TEMP=1100
```

Пример входного файла с заданием на моделирование термического отжига в инертной среде.

```
INITIALIZE SILICON <100>,B CONC=5.0E14 THICK=1 DX=0.01
IMPLANT AN DOSE=4E14 ENERGY=80 PEARSON
DIFFUSION TIME=60 TEMP=1100
PLOT CHEMICAL BORON XMAX=0.2 CMAX=2E20 CLEAR AXIS
+ LINETYPE=2
PLOT CHEMICAL AN XMAX=0.2 CMAX=2E20 ^CLEAR ^AXIS
+ LINETYPE=3
```

При нажатии кнопки Run получим распределение концентрации бора (Boron) и имплантированной сурьмы (Antimony) после высокотемпературного отжига (рис 2.10).

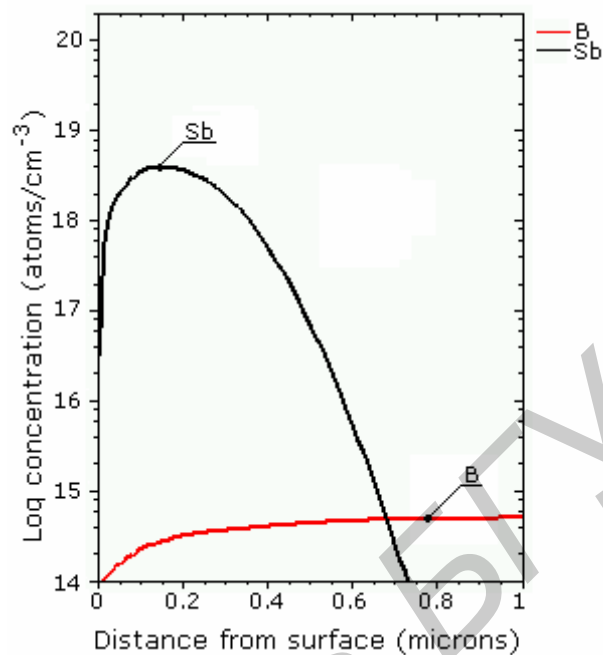


Рис. 2.10. Графики распределения примесей бора и сурьмы после термического отжига

Если температура отжига изменяется линейно со временем, то используется параметр Temperature rate.

Для формирования директивы на моделирование *окисления кремния* необходимо в подменю Ambient выбрать опцию DryO2 (окисление в среде сухого кислорода) или WetO2 (окисление во влажной среде).

После нажатия кнопки Write в окне области для ввода входных параметров в файле задания на моделирование будет записана следующая директива:

```
DIFFUSION TIME=60 TEMP=1100 WETO2
```

Здесь в качестве примера приведена директива на проведение моделирование процесса окисления во влажной среде (параметр WetO2).

Пример входного файла с заданием на моделирование процесса окисления во влажной среде.

```
INITIALIZE SILICON <100>,B CONC=5.0E14 THICK=1 DX=0.01
IMPLANT AN DOSE=4E14 ENERGY=80 PEARSON;
DIFFUSION TIME=10 TEMP=1100 WETO2
PLOT CHEMICAL BORON XMAX=0.2 CMAX=1E21 CLEAR AXIS
+ LINETYPE=2
```

```
PLOT CHEMICAL AN XMAX=0.2 CMAX=1E21 ^CLEAR ^AXIS
+ LINETYPE=3
```

При нажатии кнопки Run получим распределение концентрации бора (Boron) и имплантированной сурьмы (Antimony) после окисления в среде влажного кислорода (рис. 2.11).

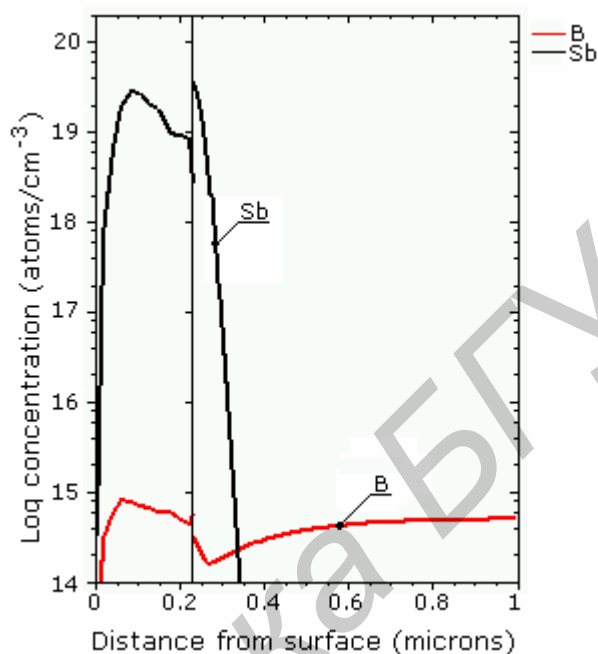


Рис. 2.11. Графики распределения примесей бора и сурьмы после окисления в среде влажного кислорода

Для формирования директивы на проведение моделирования диффузионного легирования из неограниченного источника требуется в окне для моделирования диффузии выбрать опцию Impurities, после чего откроется дополнительное подменю и окно Diffuse примет вид, представленный на рис. 2.12.

Минимальный набор параметров, требуемых для проведения моделирования высокотемпературной загонки примеси:

- время (например 60 мин.);
- температура (например 1100 °C);
- тип примеси и величина концентрации (например сурьма (Antimony) с концентрацией $4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$);
- среда.

Директива DIFFUSION, описывающая высокотемпературную загонку примеси в инертной среде с приведенными выше параметрами, имеет вид:

```
DIFFUSION TIME=60 TEMP=1100 GAS.CON=4.0E16 ANTIMONY
```

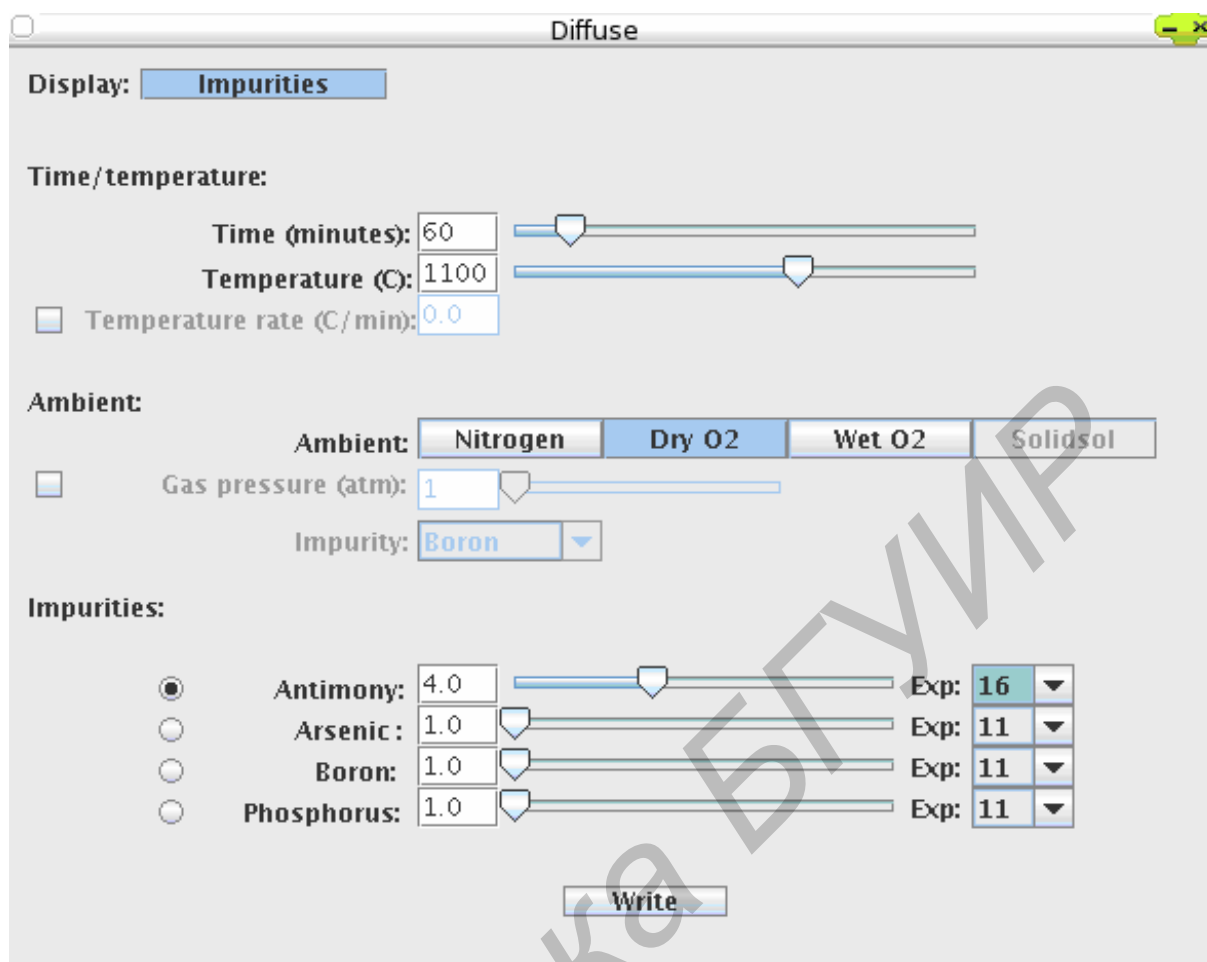


Рис. 2.12. Окно Diffuse с открытым подменю Impurities

Если в подменю Ambient выбрана одна из опций DryO2 или WetO2, то будет проводиться моделирование совместных операций – загонки примеси из неограниченного источника и окисления (соответственно в сухой или влажной атмосфере). Пример директивы на моделирование высокотемпературного перераспределения примесей с одновременным окислением:

```
DIFFUSION TIME=60 TEMP=1100 DRYO2 GAS.CON=4.0E16 ANTIMONY
```


Если при проведении операции окисления необходим учет давления в окислительной среде, то в подменю Ambient следует задать параметр Gas pressure.

Для формирования директивы на проведение моделирования загонки примеси из твердого раствора необходимо выбрать опцию подменю Solidsol, после чего станет доступной опция Impurity, с помощью которой задается тип легирующей примеси. Необходимо также задать длительность и температуру операции.

После нажатия кнопки Write в окне области для ввода входных параметров в файле задания на моделирование будет записана следующая директива:

DIFFUSION TIME=60 TEMP=1100 SOLIDSOL ANTIMONY

2.3.4. Задание параметров на моделирование процесса осаждения

Моделирование операции осаждения осуществляется с помощью директивы DEPOSITION. Для задания параметров директивы DEPOSITION выберите последовательно опции стандартного меню модуля: Commands→Deposition. После этого откроется окно, представленное на рис. 2.13. Это окно можно открыть и нажатием зеленой кнопки .

Параметры директивы DEPOSITION:

- тип осаждаемого материала (возможно моделирование осаждения на кремниевую подложку различных материалов, в том числе кремния, окиси кремния, нитрида кремния, поликремния и алюминия);
- толщина осаждаемого слоя.

Кроме того, при моделировании процесса осаждения кремния задается кристаллографическая ориентация осаждаемого слоя, а при моделировании осаждения поликремния – температура процесса осаждения.

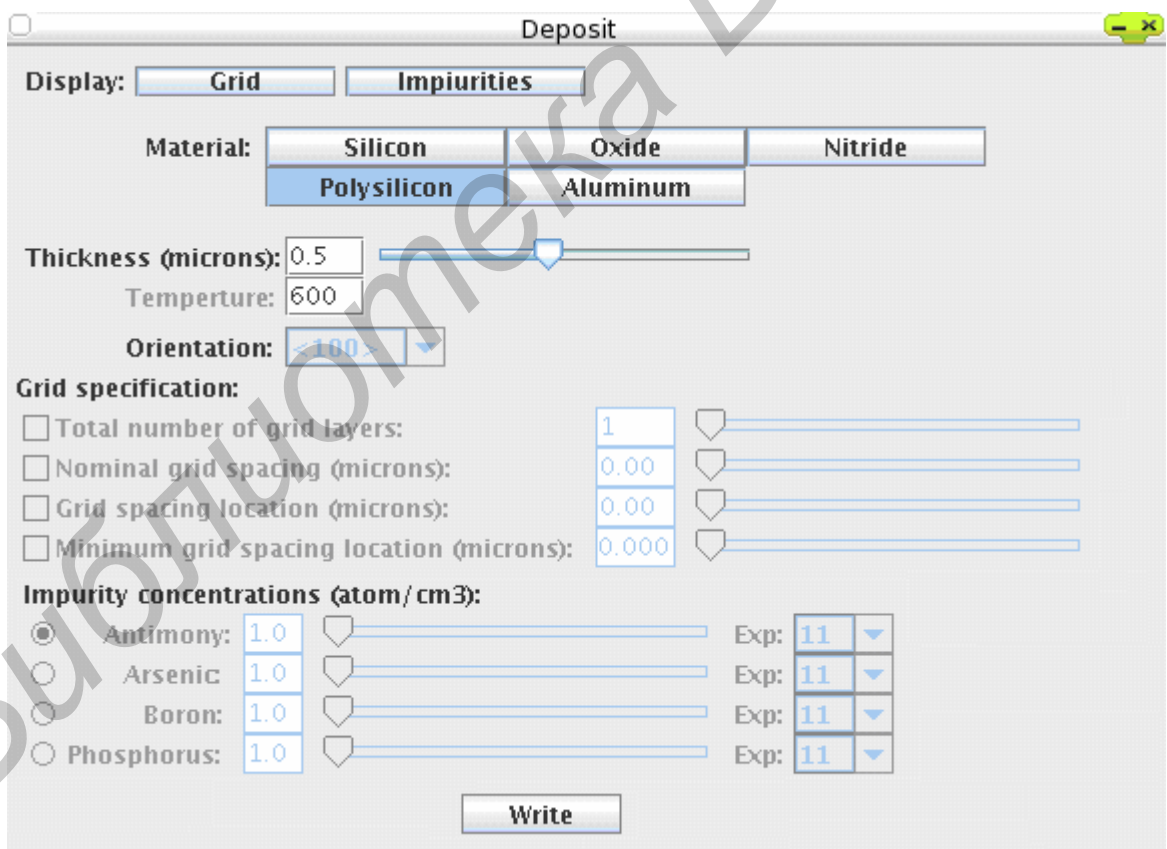


Рис. 2.13. Окно Deposit для задания параметров моделирования процесса осаждения

Как и при назначении параметров на моделирование других операций, после нажатия кнопки Write в окне области для ввода входных параметров в файле задания на моделирование будет записана следующая директива:

```
DEPOSITION POLYSILICON TEMP=600 THICK=0.5
```

В окне для задания параметров модели осаждения в левом верхнем углу размещены две прямоугольные кнопки – Grid и Impurities, включающие подменю, с помощью которых можно задать некоторые дополнительные параметры в директиве DEPOSITION, например, неравномерность сетки в осаждаемом слое и осаждение легированного слоя.

Кнопка Grid используется для включения подменю Grid specification, с помощью которого можно задать параметры расчетной сетки в осаждаемом слое. Если подменю Grid specification не активировано, то в осаждаемом слое автоматически формируется равномерная расчетная сетка. Параметры расчетной сетки осаждаемого слоя задаются таким же образом, как и для исходной подложки (см. подразд. 2.3.1).

Подменю Impurities служит для задания параметров модели процесса осаждения с одновременным легированием примесью. Рис. 2.14 иллюстрирует задание параметров на моделирование процесса осаждения слоя поликремния толщиной 0.5 мкм при температуре 600 °С, легированного фосфором с концентрацией $5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$.

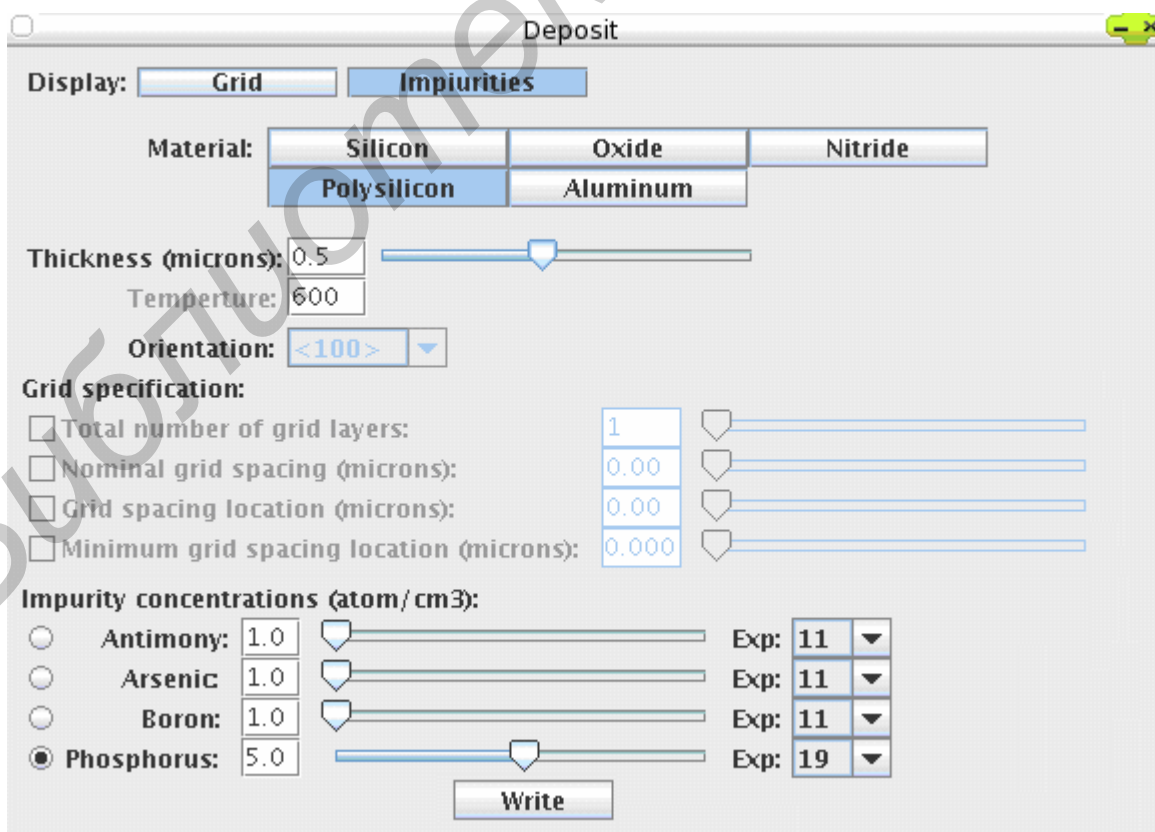



Рис. 2.14. Окно Deposit для задания расширенного по сравнению с рис. 2.13 списка параметров на проведение моделирования процесса осаждения

При нажатии кнопки Write в окне области для ввода входных параметров в файле задания на моделирование будет записана следующая директива, согласующаяся с набором параметров, приведенным на рис. 2.14:

```
DEPOSITION POLYSILICON TEMP=600 THICK=0.5 PHOS CONC=5.19
```

2.3.5. Задание параметров на моделирование процесса травления

Моделирование операции травления осуществляется с помощью директивы ETCH. Для задания параметров директивы ETCH выберите последовательно опции стандартного меню модуля: Commands→Etch. После этого откроется окно, представленное на рис. 2.15. Это окно можно открыть и нажатием зеленой кнопки .

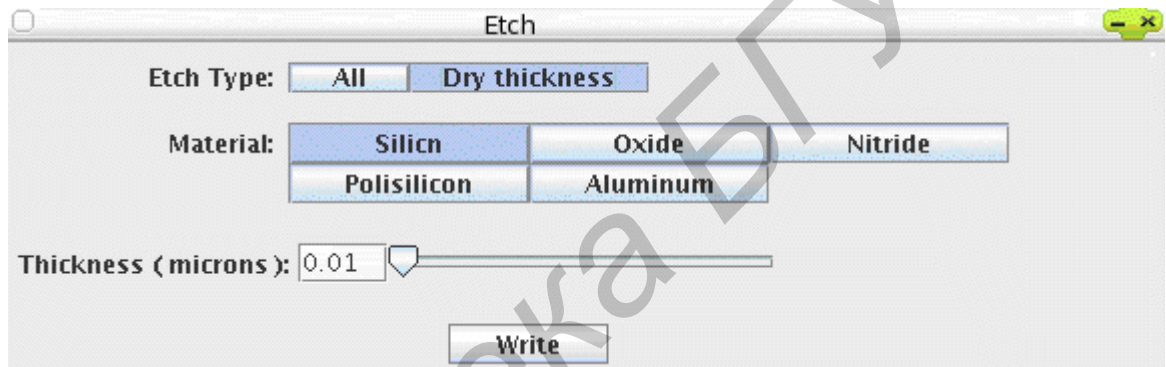


Рис. 2.15. Окно Etch для задания параметров моделирования операции травления

Возможны два режима моделирования операции травления в подменю Etch Type. При выборе опции ALL стравливается весь слой указанного материала подменю Material. Например:

```
ETCH POLYSILICON ALL
```


При выборе опции Dry thickness стравливается слой определенной толщины.

При нажатии кнопки Write в окне области для ввода входных параметров в файле задания на моделирование будет записана, например, следующая директива:

```
ETCH POLYSILICON THICK=0.01
```

2.3.6. Задание параметров на моделирование процесса эпитаксии

Моделирование операции эпитаксии осуществляется с помощью директивы EPITAXY. Для задания параметров директивы EPITAXY выберите

последовательно опции стандартного меню модуля: Commands→Epitaxy. После этого откроется окно Epitaxy, представленное на рис. 2.16. Это окно можно открыть и нажатием желтой кнопки .

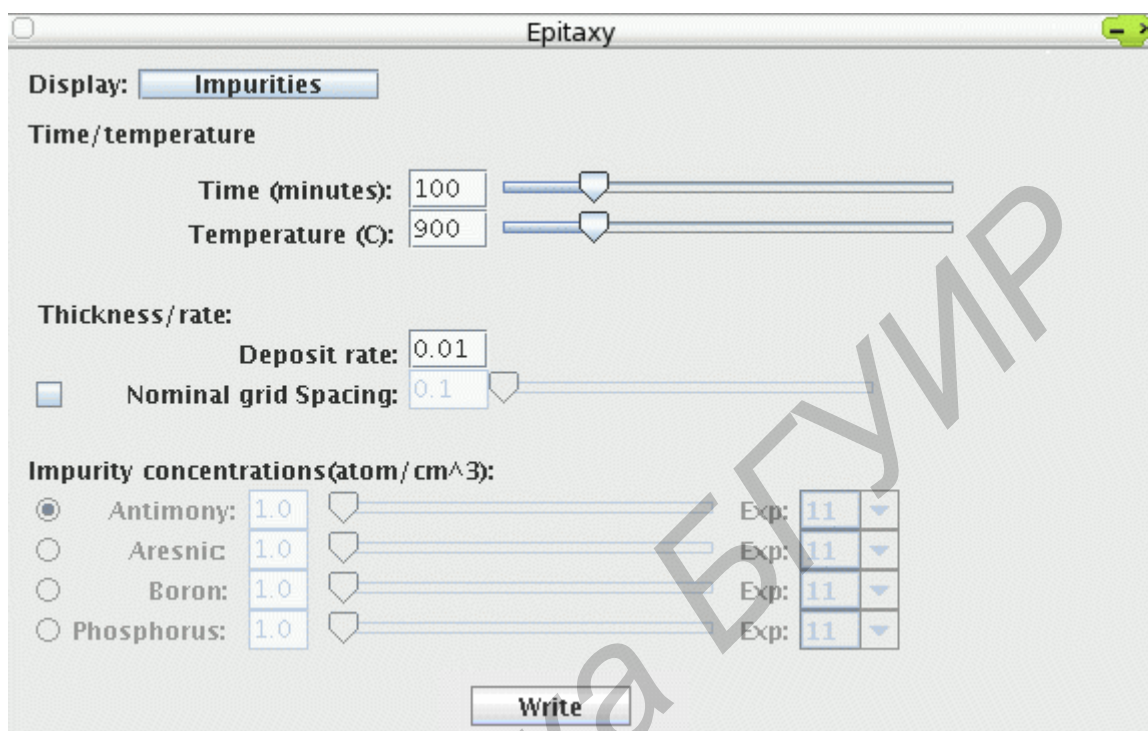


Рис. 2.16. Окно Epitaxy для задания параметров моделирования операции эпитаксии

При моделировании высокотемпературной эпитаксии этот процесс рассматривается как комбинация процессов осаждения и диффузии. Диффузионные параметры для эпитаксиальной пленки кремния берутся такими же, как и для монокремния.

Меню для моделирования процесса эпитаксии имеет следующие разделы: Time/temperature – длительность и температура моделируемого процесса эпитаксии;

Thickness/rate – толщина или скорость роста эпитаксиальной пленки;


Nominal grid Spacing – шаг расчетной сетки моделируемой структуры в пределах выращиваемого эпитаксиального слоя (по умолчанию он равен 0,01 мкм);

Impurity concentration – концентрация примеси в выращиваемой эпитаксиальной пленке.

После выбора всех необходимых параметров в область для ввода входных параметров файла будет добавлена, например, следующая директива:

```
EPITAXY TEMP=900 TIME=100 GROWTH.R=0.01
```


2.3.7. Вывод результатов моделирования в виде таблиц и графиков

Для вывода результатов моделирования в виде таблицы или графика выберите последовательно опции стандартного меню: **Commands**→**Out**. После этого откроется окно **Print/Plot**, представленное на рис. 2.17. Это окно можно открыть и нажатием кнопки .

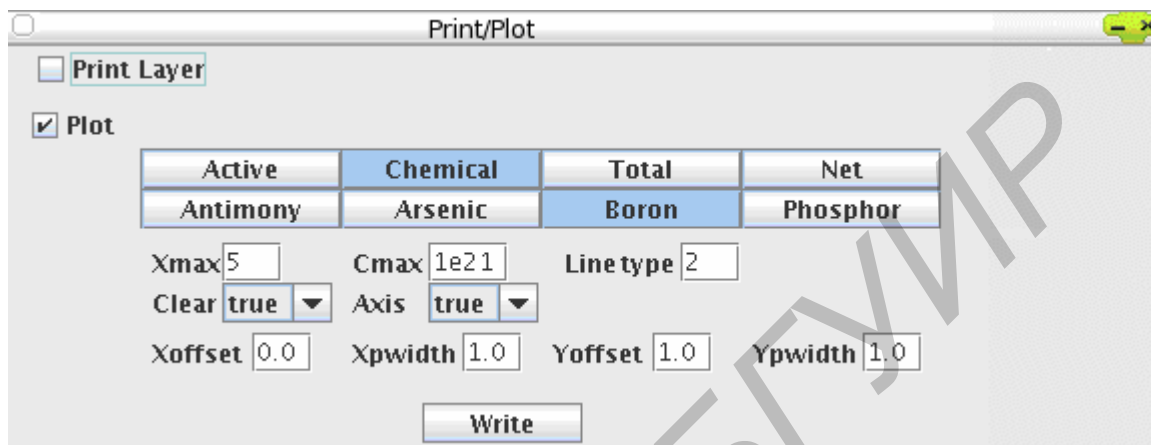


Рис. 2.17. Окно **Print/Plot** для задания параметров вывода результатов моделирования

Подменю **Print Layer** служит для вывода результатов моделирования в виде таблицы.

Подменю **Plot**, служащее для вывода результатов моделирования в виде графиков, имеет следующие опции:

Active – установка вывода распределения концентрации активных (ионизированных) примесей;

Axis – устанавливает оси графиков, что позволяет вывести несколько графиков на одном рисунке без изменения осей после каждой операции;

Chemical – установка вывода распределения концентрации неионизированных (нейтральных) примесей;

Clear – очищение окна с графиком;

Cmax – установка вывода распределения концентрации примесей, величина которой превышает значение некоторого заданного уровня C_{max} ;

Line type – задает цвет линий графика;

Net – установка вывода суммарного распределения концентрации примесей с учетом их знаков;

Total – установка вывода суммарного распределения концентрации примесей без учета их знаков;

Xmax – максимальное значение по оси X;

Xoffset – начальная координата по оси X для создания нового подокна;

Yoffset – начальная координата по оси Y для создания нового подокна;

Xpwidth – конечная координата по оси X для создания нового подокна;

Ypwidth – конечная координата по оси Y для создания нового подокна.

3. ДИРЕКТИВЫ ПРОГРАММЫ SUPREM III

Параметры в задании на моделирование с использованием программного комплекса SUPREM III определяются последовательностью предложений в соответствующем файле. Каждый из параметров принадлежит к одной из директив, приведенных в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Директивы задания на моделирование в SUPREM III

Директивы	Назначение
Title/Comment	Заголовок/Комментарий
Initialize	Описание исходной подложки
Diffusion	Моделирование диффузии
Deposition	Моделирование осаждения
Epitaxy	Моделирование эпитаксии
Etch	Моделирование травления
Implant	Моделирование имплантации
Electrical	Запуск серии численных решений уравнения Пуассона
Bias	Задание напряжения смещения (bias) и других параметров, используемых при расчете электрических характеристик моделируемой структуры
Print	Вывод результатов моделирования в виде таблицы
Plot	Вывод результатов моделирования в виде графика

Ниже приводится список директив, используемых в программном комплексе SUPREM III. Необязательные параметры или группы параметров соответствующих директив заключены в квадратные скобки в отличие от обязательных параметров, которые заключены в круглые скобки. Значком | обозначается оператор «ИЛИ». Буква n обозначается действительное значение, которое необходимо присвоить параметру.

TITLE – символьная строка, используемая в качестве заголовка файла при выводе результатов моделирования.

```
TITLE [<Символьная строка>]
```

COMMENT – комментарий.

```
COMMENT [<символьная строка>]
```

или

```
$ [<символьная строка>]
```

INITIALIZE – директива для задания информации об исходном состоянии подложки: кристаллографическая ориентация, расчетная сетка, а также начальное распределение концентрации примеси.

```
INITIALIZE
  THICKNESS=<n>
  [ SILICON (<111> | <110> | <100> )
  [ CONCENTR=<n> ( ANTIMONY | ARSENIC | BORON | PHOSPHOR ) ] ]
  [ DX=<n> ] [ XDX=<n> ] [ SPACES=<n> ]
```

Возможные кристаллографические ориентации исходной кремниевой подложки: <111>, <110> или <100>. Тип примеси определяется одним из параметров: ANTIMONY (сурьма), ARSENIC (мышьяк), BORON (бор) или PHOSPHOR (фосфор). Параметр CONCENTR – указывает на значение концентрации примеси в исходной подложке.

Величина моделируемой области в одномерном пространстве задается параметром THICKNESS (размерность – мкм). Параметры DX и SPACES – определяют шаг расчетной сетки и количество узлов. Максимальная величина SPACES равна 499 точек. Параметр XDX задает пространственную область, около которой уплотняется расчетная сетка (по умолчанию XDX=0).

DIFFUSION – директива на моделирование операции окисления и диффузионного перераспределения примесей. Формат директивы:

```
DIFFUSION
  TIME=<n> TEMPERAT=<n> [ T.RATE=<n> ]
  [ ( GAS.CONC=<n> | SOLIDSOL )
  ( ANTIMONY | ARSENIC | BORON | PHOSPHOR ]
  [ DRYO2 | WETO2 | NITROGEN ) [ PRESSURE=<n> ] ]
```

Параметры директивы DIFFUSION:

TIME – длительность проведения процесса (мин);

TEMPERAT – температура процесса (°C);

T.RATE – скорость изменения температуры (°C /мин.);

GAS.CONC – концентрация примеси на поверхности подложки в процессе диффузионного легирования (см^{-3});

SOLIDSOL – моделирование диффузионного легирования из твердофазного источника;

ANTIMONY (сурьма), ARSENIC (мышьяк), BORON (бор), PHOSPHOR (фосфор) – типы примеси при диффузионном легировании;

DRYO2, WETO2, NITROGEN – соответственно сухая, влажная или нейтральная среда;

PRESSURE – давление окислительной среды (Па).

IMPLANT – директива на моделирование операции ионной имплантации.
Формат директивы:

```
IMPLANT
DOSE=<n> ENERGY=<n>
( ANTIMONY | ARSENIC | BF2 | BORON | PHOSPHOR )
( GAUSSIAN | 2-GAUSSI | PEARSON | BOLTZMAN )
```

Параметры директивы IMPLANT:

DOSE – доза имплантации (см^{-2});

ENERGY – энергия имплантируемых ионов (кэВ).

Остальные параметры директивы IMPLANT описаны в подразд. 2.3.2 (по умолчанию используется модель PEARSON).

ETCH – директива на моделирование операции травления. Формат директивы:

```
ETCH
( SILICON | POLYSILI | OXIDE | NITRIDE | ALUMINUM )
[ ( THICKNESS=<n> | ALL ) ]
```

Параметры директивы ETCH:

SILICON, POLYSILI, OXIDE, NITRIDE, ALUMINUM – материал, подвергающийся травлению: кремний, поликремний, окисел, нитрид кремния, алюминий соответственно;

THICKNESS – глубина (мкм), на которую вытравливается выбранный материал.

EPITAXY – директива на моделирование операции эпитаксиального наращивания кремния. Формат директивы:

```
EPITAXY
TEMPERAT=<n> TIME=<n> GROWTH.R=<n> [ DX=<n> ]
[ ( ANTIMONY | ARSENIC | BORON | PHOSPHOR ) ( CONCENTR=<n> ) ]
```

Параметры директивы EPITAXY:

GROWTH.R – скорость роста эпитаксиального слоя (мкм/мин). Остальные параметры – стандартные.

DEPOSITION – директива на моделирование операции осаждения.
Формат директивы:

```
DEPOSITION
THICKNESS=<n> ( SILICON ( <111> | <110> | <100> )
```

```

| POLYSILI TEMPERAT=<n> [ PRESSURE=<n> ] | OXIDE
| NITRIDE | ALUMINUM)
[ DX=<n> ] [ XDX=<n> ] [ SPACES=<n> ] [ CONCENTRATION=<n>
( ANTIMONY | ARSENIC | BORON | PHOSPHOR) ]

```

Параметры директивы DEPOSITION имеют тот же смысл, что и параметры других директив, приведенных выше.

Директива ELECTRICAL служит для запуска серии численных расчетов уравнения Пуассона с целью получения электрических характеристик моделируемой структуры. Формат директивы:

```

ELECTRICAL
[ STEPS=<n> ] [ EXTENT=<n> ] [ TEMPERAT=<n> ]
[ ERROR=<n> ] [ MAX. ITER=<n> ] [ FILE. OUT=<c> ]

```

Параметры директивы ELECTRICAL:

ERROR – относительная ошибка между последовательными приближениями в итерационной процедуре численного решения уравнения Пуассона (по умолчанию равна $1 \cdot 10^{-4}$);

EXTENT – глубина, в пределах которой проводится численное решение уравнения Пуассона. Этот параметр необходим для учета при моделировании обедненных областей, размер которых может простираться глубоко за область моделируемой структуры (по умолчанию глубина равна 0,0 мкм);

FILE. OUT – задаваемое пользователем, имя файла, в который передаются результаты моделирования электрических характеристик, в том числе полные концентрации дырок и электронов, удельные электропроводности (conductivities) и слоевые сопротивления (sheet resistances), потенциал и концентрация активных примесей вместе с расстоянием от поверхности до каждого узла, в котором рассчитываются указанные характеристики;

MAX. ITER – максимальное число итераций при численном решении уравнения Пуассона (по умолчанию равно 50);

STEPS – число шагов изменения напряжения при численном решении уравнения Пуассона (по умолчанию равно 1);

TEMPERAT – температура, при которой моделируются электрические характеристики прибора (по умолчанию равна 26,84 °C);

Директива BIAS служит для задания напряжения смещения (bias) и других параметров, используемых при решении уравнения Пуассона для носителей заряда. Формат директивы:

```

BIAS
LAYER=<n> ( [ V. ELECTR=<n> ] [ DV. ELECTR=<n> ] )

```

```
| ( ( [DIFFUSIO=<n>] [V.MAJORI=<n>] [DV.MAJOR=<n>]
[V.MINORI=<n>] [DV.MINOR=<n>] ) ) | [FLOAT] )
```

Параметры директивы BIAS:

DIFFUSIO – индекс для определения диффузионной области, в которой задаются значения квазиуровня Ферми потенциалов (по умолчанию – все диффузионные области слоя, в пределах которого проводится моделирование);

LAYER – индекс проводника, к которому прикладывается напряжение смещения;

DV.ELECT – шаг приращения величины напряжения смещения при вариационном расчете (по умолчанию – 0,0 В);

DV.MAJOR – шаг приращения величины квазиуровня Ферми потенциала для основных носителей при вариационном расчете. Применяется для диффузионной области слоя полупроводника (по умолчанию – 0,0 В);

DV.MINOR – шаг приращения величины квазиуровня Ферми потенциала для неосновных носителей при вариационном расчете. Применяется для диффузионной области слоя полупроводника (по умолчанию – 0,0 В);

FLOAT – логический символ, означающий, что слой поликремния рассматривается как нейтральный диэлектрик. Применяется только для слоя поликремния (по умолчанию – false);

V.ELECTR – начальное значение напряжения смещения (по умолчанию – 0,0 В);

V.MAJORI – начальное значение квазиуровня Ферми потенциала для основных носителей при вариационном расчете. Применяется только для слоя полупроводника (по умолчанию – 0,0 В);

V.MINORI – начальное значение квазиуровня Ферми потенциала для неосновных носителей при вариационном расчете. Применяется только для слоя полупроводника (по умолчанию – 0,0 В);

Только одна директива BIAS может применяться для каждого слоя проводника и каждой диффузионной области слоя полупроводника. Диффузионные области ограничиваются поверхностями раздела отдельных материалов и металлургическими p-n переходами.

PRINT – директива для вывода результатов моделирования в табличном виде. Формат директивы:

```
PRINT
[CONCENTR [ACTIVE] [CHEMICAL] [TOTAL] [NET]
[ANTIMONY] [ARSENIC] [BORON] [PHOSPHOR]
[XMIN=<n>] [XMAX=<n>]] [LAYERS]
```

Параметры директивы PRINT:

ACTIVE – установка вывода распределения концентрации активных (ионизированных) примесей;

CHEMICAL – установка вывода распределения концентрации неионизированных (нейтральных) примесей;

LAYERS – вывод результатов моделирования в виде таблицы.

NET – установка вывода суммарного распределения концентрации примесей с учетом их знаков;

TOTAL – установка вывода суммарного распределения концентрации примесей без учета их знаков;

XMIN и XMAX – соответственно начальная и конечная координаты выводимого одномерного профиля распределения примесей;

PLOT – директива по выводу результатов моделирования в виде графиков. Формат директивы:

```
PLOT  
[ ACTIVE ] [ CHEMICAL ] [ TOTAL ] [ NET ]  
[ ANTIMONY ] [ ARSENIC ] [ BORON ] [ PHOSPHOR ]  
[ XMIN=<n> ] [ XMAX=<n> ] [ CMIN=<n> ] [ CMAX=<n> ]  
[ ^CLEAR | CLEAR ] [ ^AXIS | AXIS ] [ LINETYPE=<n> ]  
[ XPWIDTH=<n> ] [ YPWIDTH=<n> ]  
[ XOFFSET=<n> ] [ YOFFSET=<n> ]
```

Директива PLOT может помещаться в любом месте последовательности описания моделирования процессов после начальных директив TITLE и INITIALIZE. По оси Y откладывается десятичный логарифм концентраций; минимальное значение логарифма концентраций определяется параметром CMIN; максимальное значение логарифма концентраций определяется параметром CMAX. По оси X откладывается глубина; минимальное значение по оси X определяется параметром XMIN; максимальное – XMAX.

Параметры директивы PLOT:

AXIS – установка осей графиков. Позволяет пользователю вывести несколько графиков на одной странице без изменения осей после каждой операции;

LINETYPE – установка цвета линий;

CLEAR – служит для очищения экрана с графиком;

Значок ^ указывает на невыполнения соответствующей процедуры.

Остальные параметры обсуждены в подразд. 2.3.7.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назначение, состав и возможности модуля GUI-SUPREM III.
 2. Модели ионной имплантации, используемые в программе SUPREM III.
 3. Модели диффузии примесей, используемые в программе SUPREM III.
 4. Модели окисления, используемые в программе SUPREM III.
 5. Модели эпитаксии, используемые в программе SUPREM III.
 6. Модели осаждения и травления, используемые в программе SUPREM III.
- III.
7. Расчет электрических характеристик моделируемой приборной структуры в программе SUPREM III.
 8. Принципы формирования файла с заданием на моделирование в SUPREM III.
 9. Директива и ее параметры на создание равномерной расчетной сетки.
 10. Директива и ее параметры на создание неравномерной расчетной сетки.
 11. Директива и ее параметры на описание состояния исходной подложки.
 12. Директива и ее параметры на моделирование процесса ионной имплантации.
 13. Директива и ее параметры на моделирование процесса отжига в инертной среде.
 14. Директива и ее параметры на моделирование процесса окисления.
 15. Директива и ее параметры на моделирование процесса легирования из неограниченного источника.
 16. Директива и ее параметры на моделирование процесса осаждения.
 17. Директива и ее параметры на моделирование процесса травления.
 18. Директива и ее параметры на моделирование процесса эпитаксии.
 19. Директива и ее параметры на расчет электрических характеристик моделируемой структуры.
 20. Директива и ее параметры на вывод результатов моделирования в табличном виде.
 21. Директива и ее параметры на вывод результатов моделирования в виде графиков.
 22. Основные этапы технологического маршрута формирования биполярного n-p-n транзистора и организация файла для моделирования технологии его формирования.
 23. Меры для увеличения/уменьшения величины слоевого сопротивления на переходе «база – коллектор» биполярного n-p-n транзистора.
 24. Меры для увеличения/уменьшения величины слоевого сопротивления на переходе «эмиттер – база – коллектор» биполярного n-p-n транзистора.

ЛИТЕРАТУРА

1. <http://www.eecad.com>.
2. В.В. Нелаев. Физическое моделирование технологических процессов в программе SUPREM II: учеб. пособие – Минск. : БГУИР, 1998. – 37 с.
3. В.В. Нелаев. Программа SUPREM II моделирования технологии изготовления интегральных схем: метод. пособие – Минск. : БГУИР, 1998. – 26 с.
4. SSUPREM3. User's Manual. 1D Process simulation // SILVACO International. August 2000.
5. В.В. Нелаев, В.Р. Стемпицкий. Технологическое проектирование интегральных схем. Программа SSUPREM4: учеб. пособие – Минск. : БГУИР, 2004. – 102 с.
6. <http://www.silvaco.com>.
7. M. Najbuk, V. Nelayev. Internet-based learning and design in microelectronics // Proc. Int Conf. «e-learning jako metoda spomagajaca proces kształcenia» – Gdańsk, Poland, 2006. – P.72–76.
8. М.Н. Найбук. Internet-обучение технологии в микроэлектронике с использованием программного модуля GUI-SUPREM III // Матер. V межд. науч.-метод. конф. «Дистанционное обучение – образовательная среда XXI века» – Минск, 10–12 ноября 2005 г. – С. 92– 95.
9. <http://e-rudio.net>.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Пример моделирования технологии формирования структуры биполярного n-p-n транзистора и его электрических характеристик с использованием модуля GUI-SUPREM III

Для иллюстрации функциональных возможностей модуля GUI-SUPREM III ниже приведен пример моделирования типичной технологии формирования структуры n-p-n биполярного транзистора и электрических характеристик сформированной структуры. Технологический маршрут представляет собой последовательность операций создания скрытого слоя посредством имплантации мышьяка с последующим эпитаксиальным наращиванием пленки кремния для формирования области коллектора, имплантации и разгонки примесей в областях базы и эмиттера.

Ниже приведены содержание входного файла задания на моделирование и результаты расчетов в графическом виде.

№ строки файла	Содержание строки
1	Title Биполярный транзистор
2	Initialize <100> Silicon, Boron Concentration=5e14 + Thickness=5. dX=.01 XdX=.05 Spaces=100
3	Diffusion Temperature=1150 Time=100 WetO2
4	Etch Oxide
5	Implant Antimony Dose=5E14 Energy=120
6	Plot Chemical Boron Xmax=3 Clear ^Axis Linetype=2
7	Plot Chemical Antimony Xmax=3 ^Clear ^Axis Linetype=1
8	Plot Chemical Net Xmax=3 ^Clear Axis Linetype=1
9	Diffusion Temperature=1150 Time=15 DryO2
10	Diffusion Temperature=1150 Time=300
11	Plot Chemical Boron Xmax=3 Clear ^Axis Linetype=2
12	Plot Chemical Antimony Xmax=3 ^Clear ^Axis Linetype=1
13	Plot Net Chemical Xmax=5 Linetype=1
14	Electrical Steps=10
15	Bias Layer=1
16	End
17	Etch Oxide
18	Epitaxy Temperature=1050 Time=4 Growth.Rate=.4 Arsenic + Gas.Conc=5E15
19	Diffusion Temperature=1050 Time=20 DryO2
20	Deposit Nitride Thickness=.08
21	Diffusion Temperature=1000 Time=15 DryO2
22	Diffusion Temperature=1100 Time=210 WetO2
23	Diffusion Temperature=1100 Time=15 DryO2
24	Etch Oxide

24	Etch Nitride
26	Etch Oxide
27	Implant Boron Dose=1E14 Energy=50
28	Plot Chemical Boron Xmax=5 Cmax=1e20 Clear Axis + Linetype=2
29	Plot Chemical Antimony Xmax=5 ^Clear ^Axis Linetype=1
30	Plot Chemical Net Xmax=5 ^Clear ^Axis Linetype=1
31	Diffusion Temperature=1100 Time=15 DryO2
32	Plot Chemical Boron Xmax=5 Cmax=1e20 Clear Axis + Linetype=2
33	Plot Chemical Antimony Xmax=5 ^Clear ^Axis Linetype=1
34	Plot Chemical Net Xmax=5 ^Clear ^Axis Linetype=1
35	Etch Oxide
36	Implant Arsenic Dose=1E16 Energy=50
37	Plot Chemical Boron Xmax=6 Clear ^Axis Linetype=2
38	Plot Chemical Arsenic Xmax=6 ^Clear ^Axis Linetype=5
39	Plot Chemical Antimony Xmax=6 ^Clear ^Axis Linetype=1
40	Plot Chemical Net Xmax=6 ^Clear Axis Linetype=1
41	Diffusion Temperature=1000 Time=20 DryO2
42	Plot Active Boron Xmax=6 Clear ^Axis Linetype=2
43	Plot Active Arsenic Xmax=6 ^Clear ^Axis Linetype=5
44	Plot Active Antimony Xmax=6 ^Clear ^Axis Linetype=1
45	Plot Active Net Xmax=6 ^Clear Axis Linetype=1
46	Electrical Steps=10
47	Bias Layer=1
48	End
49	Stop

Строка 1 входного файла – имя проводимого расчета (биполярный транзистор). Это имя используется в качестве заголовка при выводе информации на печать и в выходном файле с результатами моделирования.

Строка 2 – описание основных параметров исходной подложки и моделируемой области. Здесь кремниевая подложка легирована бором с концентрацией $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ и имеет кристаллографическую ориентацию $\langle 100 \rangle$. Толщина моделируемой области равна 5 мкм. Шаг расчетной сетки устанавливается неравным с уплотнением в области 0,05 мкм, величина шага расчетной сетки в этой области равна 0,01 мкм, при этом количество задействованных узлов расчетной сетки равно 100.

Строка 3 описывает параметры процесса окисления кремниевой подложки, проводимого с целью формирования маски (длительность процесса – 100 мин, среда – влажный кислород, температура процесса – 1150 °C) перед легированием скрытого слоя посредством имплантации сурьмы.

Далее проводится операция вскрытия окна в окисле для формирования скрытого слоя посредством травления окисла (строка 4).

После этого проводится легирование скрытого слоя имплантацией сурьмы с дозой $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ и энергией 120 кэВ (строка 5).

Вывод результатов моделирования в виде графиков распределения концентраций примесей отдельно для бора, сурьмы и суммарной концентрации после операции имплантации сурьмы задается строками 6, 7, 8, а соответствующие графики представлены на рис. П1 и П2.

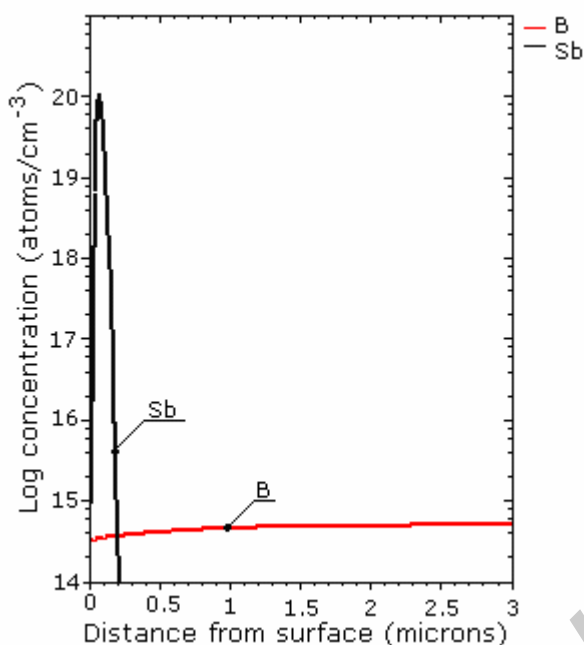


Рис. П1. Распределение концентраций бора и сурьмы после операции имплантации сурьмы

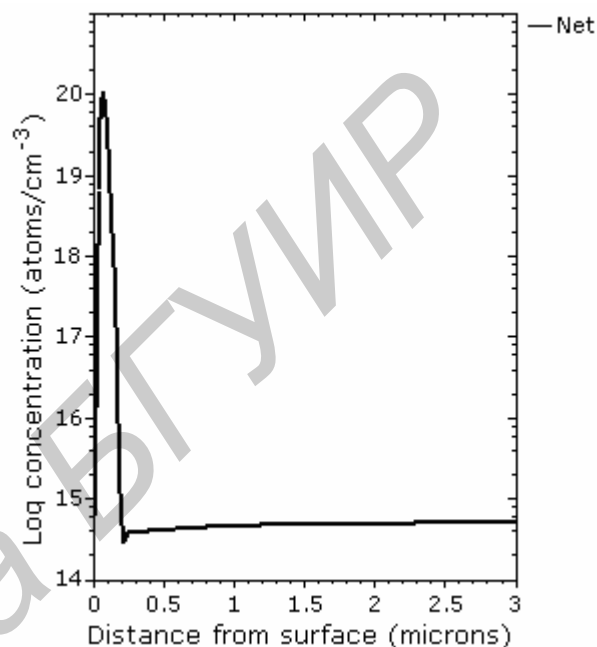


Рис. П2. Распределение суммарной концентрации бора и сурьмы после операции имплантации сурьмы

Далее проводятся операции окисления поверхности подложки в сухом кислороде при температуре 1150 °С в течение 15 мин для формирования маски (строка 9) и разгонки примесей в течение 300 мин. при температуре 1150 °С (строка 10).

Вывод результатов моделирования операций окисления и разгонки в виде графиков распределения концентраций сурьмы, бора и суммарной концентрации примесей задается строками 11, 12, 13. Соответствующие результаты показаны на рис. П3 и П4.

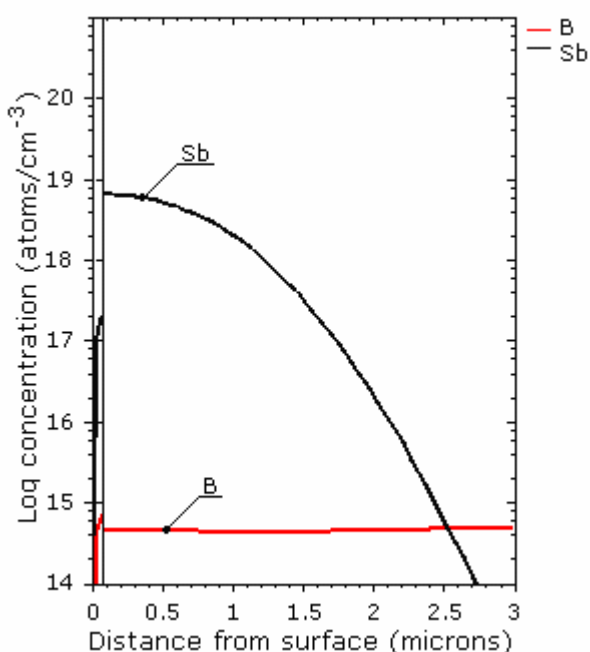


Рис. П3. Распределение концентраций бора и сурьмы после операций окисления и разгонки

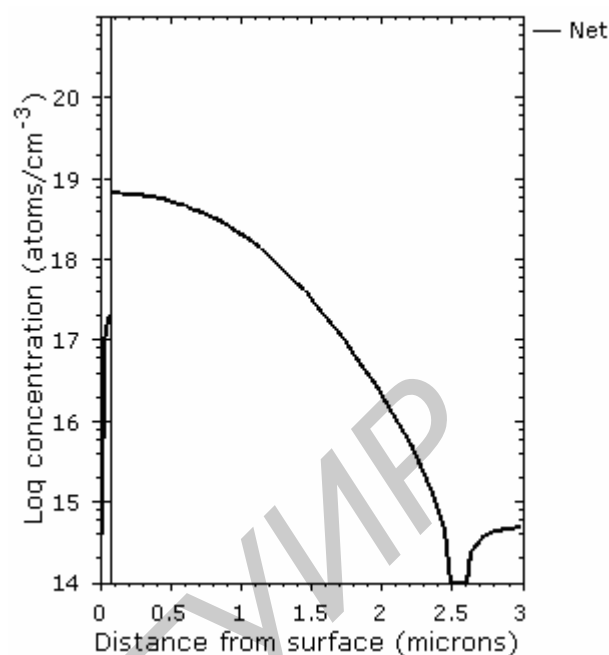


Рис. П4. Распределение суммарной концентрации бора и сурьмы после операций окисления и разгонки

Проведение расчетов электрических характеристик сформированной структуры и вывод соответствующих результатов задаются строками 14, 15 и 16, а результаты расчетов в табличном виде представлены на рис. П5 и П6.

Run						
Junction Depths and Integrated Dopant Concentrations for Each Diffused Region						
layer no.	region no.	type	junction depth (microns)	net active Qd	total chemical Qd	
2	1	n	.0000	0.0000E+00	7.8708E+11	
1	2	n	.0000	4.9038E+14	4.9060E+14	
1	1	p	2.4736	9.6527E+10	1.0662E+11	

Рис. П5. Результат расчета глубин залегания p-n-переходов и объемных зарядов в моделируемой структуре после имплантации сурьмы в область скрытого слоя и последующей разгонки

Здесь приведены значения глубин залегания (junction depth) p-n-переходов (в микронах), объемных зарядов Q_D (в кулонах). Они обусловлены ионизированными (active) примесями в количестве, равном алгебраической сумме донорных и акцепторных примесей (net), и отдельными примесями (chemical), в соответствующих элементах моделируемой структуры, характеризующихся номером слоя (layer no.) и номером области (region no.). Индексы слоев и областей задаются в директиве ELECTRICAL.

Run								
Step	Layer	Region		Concentration		Conductivity		Sheet Resistivity
		Holes	Electrons	Holes	Electrons	Holes	Electrons	
4	1	2	1.014E+02	4.903E+14	3.302E-11	4.935E+01	8.312E+01	
4	1	1	5.721E+10	2.202E+07	2.135E-02	2.386E-05	2.221E+05	

Рис. Пб. Результат расчета основных электрических характеристик (концентраций носителей, удельной проводимости и слоевого сопротивления) моделируемой структуры после имплантации сурьмы в область скрытого слоя и последующей разгонки

Здесь приведены значения концентраций (concentration) электронов и дырок, удельных проводимостей (conductivity), обусловленных электронами и дырками, а также слоевых сопротивлений (sheet resistivity) в соответствующих элементах моделируемой структуры.

Далее проводится операция травления окисла перед операцией эпитаксиального наращивания (строка 17).

Последующая операция эпитаксиального наращивания кремния описывается строкой 18 (длительность процесса – 4 мин, скорость роста эпилленки – 0.4 мкм/мин, температура процесса – 1050 °С). Процесс эпитаксии проводится с одновременным легированием мышьяком с равномерной концентрацией $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

Затем проводится операция окисления в сухом кислороде при температуре 1050 °С в течение 20 мин (строка 19).

После этого на слой окисла осаждается пленка нитрида кремния толщиной 0,8 мкм (строка 20).

Далее последовательно проводятся операции окисления в атмосфере сухого кислорода при температуре 1000 °С в течение 15 мин (строка 21), во влажном кислороде при температуре 1100 °С в течение 210 мин (строка 22 и, наконец, в сухом кислороде при температуре 1100 °С в течение 15 мин (строка 23) для создания маски и одновременного перераспределения примесей.

Затем проводится операция вскрытия окна для формирования области базы транзистора посредством последовательного травления областей окисла, нитрида и лежащего под ним другого слоя окисла (строки 24, 25, 26).

Легирование бором области базы осуществляется посредством операции ионного легирования (строка 27) с параметрами: доза – $1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$, энергия – 50 кэВ.

Вывод результатов моделирования, включая операцию легирования бором области базы, в виде графиков распределения концентраций отдельных примесей и суммарной концентрации примесей в моделируемой структуре задается строками 28, 29 и 30. Соответствующие графики распределения примесей показаны на рис. П7 и П8.

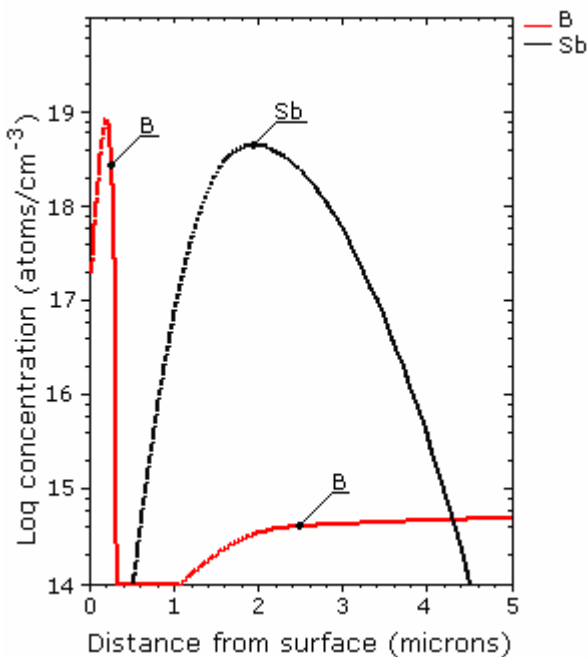


Рис. П7. Распределение концентраций бора и сурьмы после операции легирования бором области базы

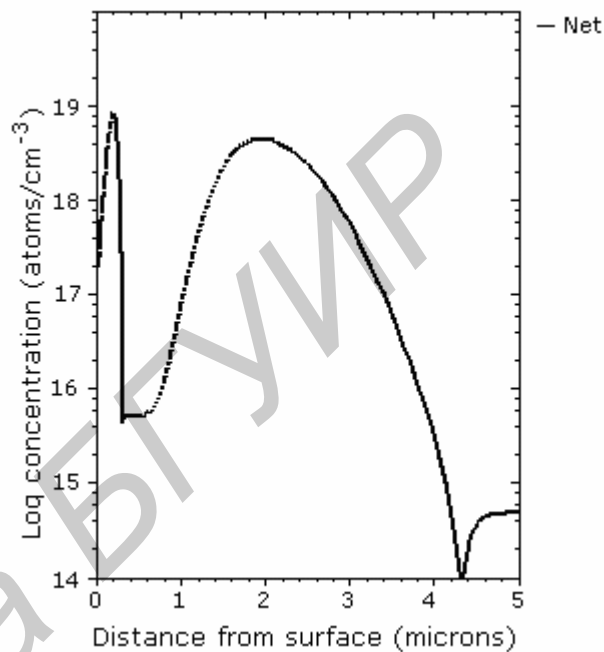


Рис. П8. Распределение суммарной концентрации бора и сурьмы после операции легирования бором области базы

Формирование окисной маски для последующего легирования области эмиттера проводится посредством окисления в атмосфере сухого кислорода при температуре 1100 °С в течение 15 мин (строка 31).

В строках 32, 33 и 34 содержатся директивы для организации вывода графиков результирующих распределений примесей в моделируемой области после этих операций, а соответствующие графические зависимости представлены на рис. П9 и П10.

Строка 35 – директива на моделирование локального травления окисла. Задание параметров легирования эмиттера посредством ионной имплантации мышьяка через окно в маске содержится в строке 36 (доза имплантации – $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$, энергия имплантируемых ионов мышьяка – 50 кэВ).

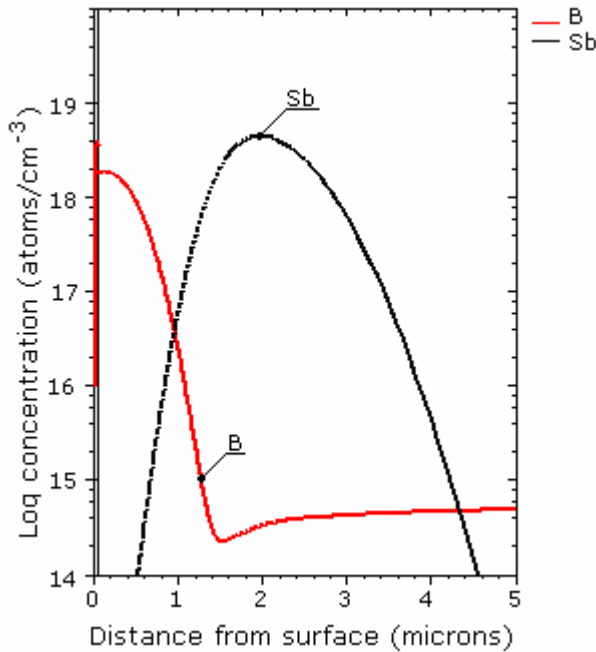


Рис. П9. Распределение концентраций бора и сурьмы после операции локального окисления

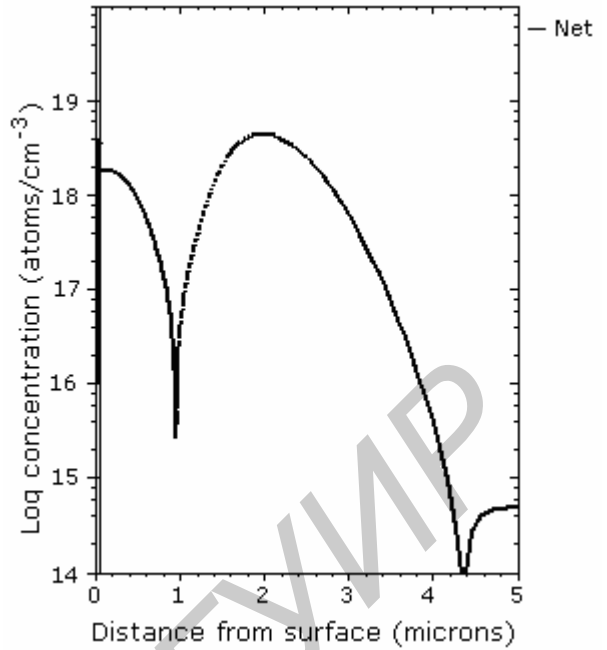


Рис. П10. Распределение суммарной концентрации бора и сурьмы после операции локального окисления

В строках 37 – 40 содержатся директивы для организации вывода графиков результирующего распределения примесей в моделируемой структуре после операции имплантации мышьяка. Соответствующие графические зависимости представлены на рис. П11 и П12.

Последняя операция – пассивация созданной структуры посредством окисления в сухом кислороде при температуре 1000 °С в течение 20 мин (строка 41).

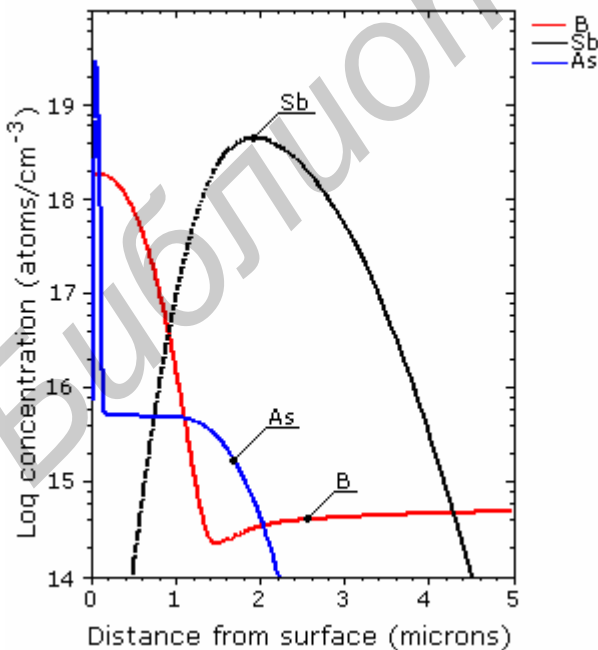


Рис. П11. Зависимости концентрации примесей (бор, сурьма, мышьяк) по глубине подложки после имплантации мышьяка в область

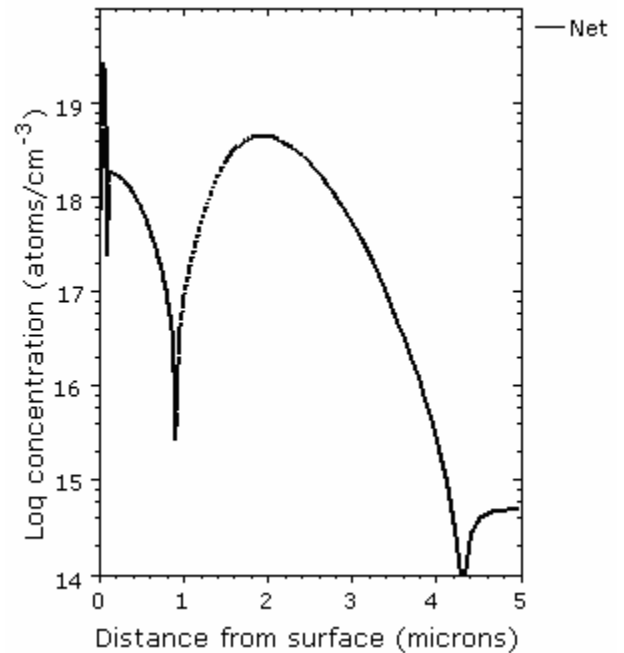


Рис. П12. Суммарный профиль распределения примесей для условий рис. П11

эмиттера

В строках 42 – 45 содержатся директивы для организации вывода графиков результирующего распределения примесей в моделируемой области после операции пассивации, а соответствующие графические зависимости представлены на рис. П13 и П14.

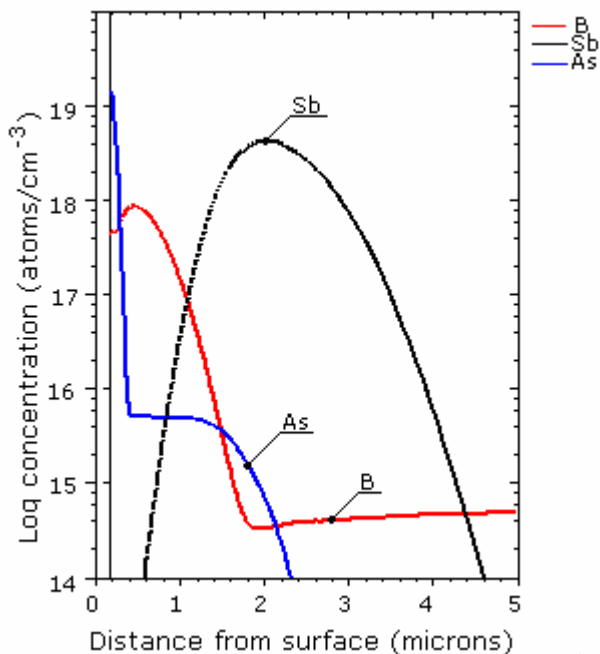


Рис. П13. Зависимости концентрации примесей (бор, сурьма, мышьяк) по глубине подложки после операции пассивации

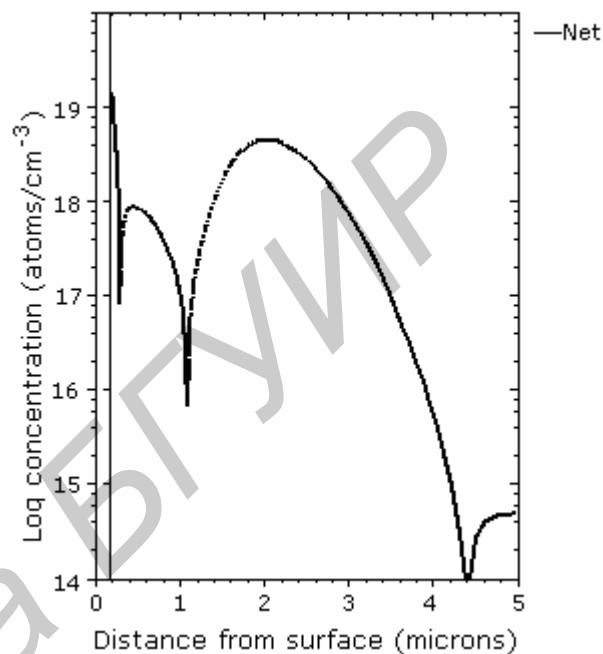


Рис. П14. Суммарный профиль распределения примесей для условий рис. П.13

Run								
Step	Layer	Region	Concentration		Conductivity		Sheet Resistivity	
			Holes	Electrons	Holes	Electrons		
5	1	4	0.000E+00	3.790E+15	0.000E+00	1.070E+03	3.392E+01	
5	1	3	2.522E+13	1.301E+05	1.327E+01	1.027E-07	1.177E+03	
5	1	2	4.583E+03	4.877E+14	7.215E-10	4.199E+01	7.091E+01	
5	1	1	4.482E+10	5.802E+06	1.943E-02	7.331E-06	2.836E+05	

Рис. П16. Результат расчета концентраций носителей, удельной проводимости и слоевого сопротивления моделируемой структуры в конце технологического маршрута формирования n-p-n биполярного транзистора

Run						
Junction Depths and Integrated Dopant Concentrations for Each Diffused Region						
layer no.	region no.	type	junction depth (microns)	net active Qd	total chemical Qd	
2	2	p	.0000	0.0000E+00	3.7829E+09	
2	1	n	.0015	0.0000E+00	4.4150E+14	
1	4	n	.0000	3.7917E+15	9.6055E+15	
1	3	p	.2804	2.7235E+13	2.9488E+13	
1	2	n	.9204	4.8817E+14	4.8994E+14	
1	1	p	4.3113	8.2594E+10	9.0933E+10	

Рис. П15. Результат расчета глубин залегания p-n-переходов и объемных зарядов в моделируемой структуре в конце технологического маршрута формирования n-p-n биполярного транзистора

Данные, представленные на рис. П15 и П16 позволяют сделать вывод о глубинах залегания p-n переходов X_j и о слоевых сопротивлениях r_s в созданной структуре:

- эмиттер–база: $X_{EB}=0,28$ мкм, $r_s=33,92$ Ом/□;
 - база–коллектор $X_{BC}=0,92$ мкм, $r_s=1,177 \cdot 10^3$ Ом/□;
 - коллектор–подложка $X_{CS}=4,31$ мкм, $r_s=70,91$ Ом/□.
- Строка 49 – конец задания на моделирование.

Учебное издание

Найбук Мирослав Николаевич

Нелаев Владислав Викторович

**ПРОГРАММНЫЙ МОДУЛЬ GUI-SUPREM III
ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ**

Методическое пособие
по дисциплине «Основы САПР в микроэлектронике»

для студентов специальностей
I-41 01 02 «Микро- и нанoeлектронные технологии и системы»,
I-41 01 03 «Квантовые информационные системы»
дневной, заочной и дистанционной форм обучения

Редакторы С.Б. Саченко, Крюкова Т.Н
Корректор

Подписано в печать
Гарнитура «Таймс».
Уч.-изд. л. 2,6

Формат 60x84 1/16.
Печать ризографическая.
Тираж 100 экз.

Бумага офсетная.
Усл. печ. л.
Заказ 124.

Издатель и полиграфическое исполнение: Учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
ЛИ №02330/0056964 от 01.04.2004.
ЛП №02330/0131666 от 30.04.2004.
220013, Минск, П. Бровки, 6