

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
технический университет»

А.В. Арсентьев Е.Ю. Плотникова

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
И ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ:
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

Утверждено Редакционно-издательским советом
университета в качестве учебного пособия

Воронеж 2016

УДК 4.14.23, 550.34.013.4

Арсентьев А.В. Математическое моделирование технологических процессов и интегральных схем: лабораторный практикум: учеб. пособие [Электронный ресурс]. – Электрон. текстовые и граф. данные (5,5 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 1024x768; Adobe Acrobat; CD-ROM дисковод; мышь. – Загл. с экрана.

В учебном пособии представлены материалы по моделированию технологических процессов микро- и нанoeлектронного производства в системе автоматизированного проектирования Silvaco TCAD. Приведены справочные материалы по методам моделирования технологических операций, примеры моделей технологических процессов с учетом различных параметров и задания для лабораторных работ.

Издание соответствует требованиям Федерального государственного образовательного стандарта высшего образования по направлению 11.03.04 «Электроника и нанoeлектроника» (профили «Микроэлектроника и твердотельная электроника», «Электронное машиностроение»), дисциплине «Методы математического моделирования».

Ил. 47. 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 физ.-мат. наук, проф. А.В. Строгонов

© Арсентьев А.В., Плотникова Е.Ю., 2016

© Оформление. ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2016

ВВЕДЕНИЕ

Интегральная электроника – одна из наиболее востребованных отраслей современной промышленности. В лабораторном практикуме освещены теоретические и практические аспекты моделирования наиболее распространенных технологических операций изготовления приборов электронной техники.

Первым этапом создания прибора электронной техники является выращивание кристалла и подготовка полупроводниковых подложек. После подготовки подложек начинается непосредственный процесс изготовления полупроводниковых структур, рассматриваемый в данном пособии. В реальном технологическом процессе многие из приведенных технологических операций неоднократно повторяются в цикле производства (фотолитография, травление и др.).

Моделирование технологических операций - эффективный инструмент оптимизации технологического процесса, характеризующийся по сравнению с экспериментальным подходом быстротой и дешевизной получения результатов. Современное программное обеспечение позволяет строить модели, как дискретных технологических процессов, так и полного цикла производства прибора с высокой точностью.

Лабораторный практикум разделен на блоки лабораторных работ по каждой технологической операции изготовления приборов полупроводниковой электроники. В лабораторных работах 1 и 2 представлены технологические маршруты изготовления диода Шоттки, МОП транзистора и биполярного транзистора. В работах № 3-10 приводится принцип моделирования каждой технологической операции с учетом влияния параметров среды, настроек оборудования и физических законов.

Для итоговой проверки знаний по пройденному материалу каждым студентом выполняется моделирование полного технологического маршрута изготовления реального прибора, используемого на предприятиях г. Воронежа.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

Знакомство с редакторами Athena и Atlas. Исследование базовых компонентов полупроводниковой технологии: диода и МОП-транзистора

1. Прямая ветвь характеристики диода Шоттки

Диод Шоттки — полупроводниковый диод с малым падением напряжения при прямом включении. Назван в честь немецкого физика Вальтера Шоттки. В специальной литературе часто используется более полное название — Диод с барьером Шоттки (ДШБ).

В диодах Шоттки в качестве барьера Шоттки используется переход металл-полупроводник, в отличие от обычных диодов, где используется р-п переход. Переход металл-полупроводник обладает рядом особенных свойств (отличных от свойств полупроводникового р-п перехода). К ним относятся: пониженное падение напряжения при прямом включении, высокий ток утечки, очень маленький заряд обратного восстановления. Последнее объясняется тем, что по сравнению с обычным р-п переходом у таких диодов отсутствует диффузия, связанная с инжекцией неосновных носителей, т.е. они работают только на основных носителях, а их быстродействие определяется только барьерной емкостью.

Диоды Шоттки изготавливаются обычно на основе кремния (Si) или арсенида галлия (GaAs), реже — на основе германия (Ge). Выбор металла для контакта с полупроводником определяет многие параметры диода Шоттки. В первую очередь — это величина контактной разности потенциалов, образующейся на границе металл-полупроводник. При использовании диода Шоттки в качестве детектора она определяет его чувствительность, а при использовании в смесителях — необходимую мощность гетеродина. Поэтому чаще всего используются металлы Ag, Au, Pt, Pd, W, которые наносятся на полупроводник и дают величину потенциального барьера 0,2...0,9 КэВ.

Допустимое обратное напряжение выпускаемых диодов Шоттки ограничено 1200 вольт (CSD05120 и аналоги), на практике большинство диодов Шоттки применяется в низковольтных цепях при обратном напряжении порядка единиц и нескольких десятков вольт.

Код примера демонстрирует технологию моделирования прямой ветви характеристики диода Шоттки, по которой можно определить:

- а) методику формирования структуры диода с использованием синтаксиса редактора Atlas,
- б) задание величины барьера Шоттки на аноде,
- в) прямое смещение анода.

В первой части примера устанавливается структура прибора, в которую входят настройка сетки расчета, указание местоположения электродов и распределение легирующей примеси. Строится двумерный прибор на подложке n-типа с сильно легированными областями охрannого кольца p-типа проводимости, расположенными справа и слева от структуры. Анод Шоттки расположен в верхней части прибора, а сильно легированный катод – внизу.

После того, как в программе было проведено описание будущей структуры, команда **model** определяет метод, по которому будет проводиться моделирование структуры. В САПР TCAD используются несколько моделей: по зависимости подвижности носителей заряда от их концентрации (**ccsmob**), по зависимости подвижности носителей заряда от приложенного поля, по сужению запрещенной зоны, по рекомбинации Шоккли-Рида-Холла или Аугера. Также рассматривается модель парных носителей заряда (число носителей = 2).

Ключевым параметром для задания контакта Шоттки является **contact name= work=**. Он позволяет задать работу выхода на электроде Шоттки. Поскольку в данном случае в качестве подложки используется кремниевая пластина n-типа проводимости, сродство к электрону которой равно 4,17, работа выхода 4,96 установит барьер Шоттки высотой 0,8 В. По

умолчанию барьер равен нулю (идеальный омический контакт) – задается для электрода катода.

Электрическое моделирование линейно изменяет напряжение на аноде до 1 В с шагом 0,05 В с помощью команды **solve**. Итоговый график выводится на экран с помощью редактора TonyPlot.

```
# Прямая ветвь характеристики диода Шоттки
go atlas
# параметр масштабирования сетки «mesh space.mult»
# позволяет глобально задать множитель, который будет использо-
# ваться при построении сетки для расчета структуры
mesh space.mult=1.0

# определение геометрических размеров структуры по
оси X и шага сетки по оси X
x.mesh loc=0.00 spac=0.5
x.mesh loc=3.00 spac=0.2
x.mesh loc=5.00 spac=0.25
x.mesh loc=7.00 spac=0.25
x.mesh loc=9.00 spac=0.2
x.mesh loc=12.00 spac=0.5
# определение геометрических размеров структуры по
оси Y и шага сетки по оси Y
y.mesh loc=0.00 spac=0.1
y.mesh loc=1.00 spac=0.1
y.mesh loc=2.00 spac=0.2
y.mesh loc=5.00 spac=0.4

# материал первой области - кремний
region num=1 silicon
```

для первого электрода присваивается имя – анод, электрод расположен в структуре начиная с точки 5 (5 мкм) по оси X, длина электрода – 2 мкм; имя второго электрод – катод, он распространен по всей обратной стороне структуры

```

electr name=anode x.min=5 length=2
electr name=cathode bot

# равномерное легирование эпитаксиального слоя при-
месью n-типа с концентрацией  $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ 
doping n.type conc=5.e16 uniform

# легирование примесью p-типа заданной концентрации
для формирования защитного кольца, размеры областей от 0 до
3 и от 9 до 12 мкм, первый p-n переход, распределение по Гаус-
су
doping p.type conc=1e19 x.min=0 x.max=3 junc=1 rat=0.6
gauss
doping p.type conc=1e19 x.min=9 x.max=12 junc=1 rat=0.6
gauss

# равномерное легирование примесью n+ типа в задан-
ной концентрации области в диапазоне от 0 до 12 мкм по оси
X, в глубину от 2 до 5 мкм
doping n.type conc=1e20 x.min=0 x.max=12 y.top=2
y.bottom=5 uniform

# сохранение построенной структуры в файл типа .str и
выведение этой структуры на экран
save outf=diod1_0.str
tonyplot diod1_0.str -set diod1_0.set

# одновременное использование различных моделей
(указаны выше) для расчета характеристик структуры (стр. 71
описания Atlas_users1.pdf); работа выхода задается для контак-
та анода
model conmob fldmob srh auger bgn
contact name=anode workf=4.97

# если раньше при моделировании расчеты не проводи-
лись, первое приближение параметров структуры (потенциала,

```

концентрации носителей и т.д.) будут приблизительно определены из степени легирования

```
solve init
```

```
# выбирается метод расчета структуры  
method newton
```

```
# запись выходного файла характеристик структуры;  
напряжение на аноде меняется от 0,05 до 1 В с шагом 0,05
```

```
log outfile=diod1.log
```

```
solve vanode=0.05 vstep=0.05 vfinal=1 name=anode
```

```
tonyplot diod1.log -set diod1_log.set
```

```
quit
```

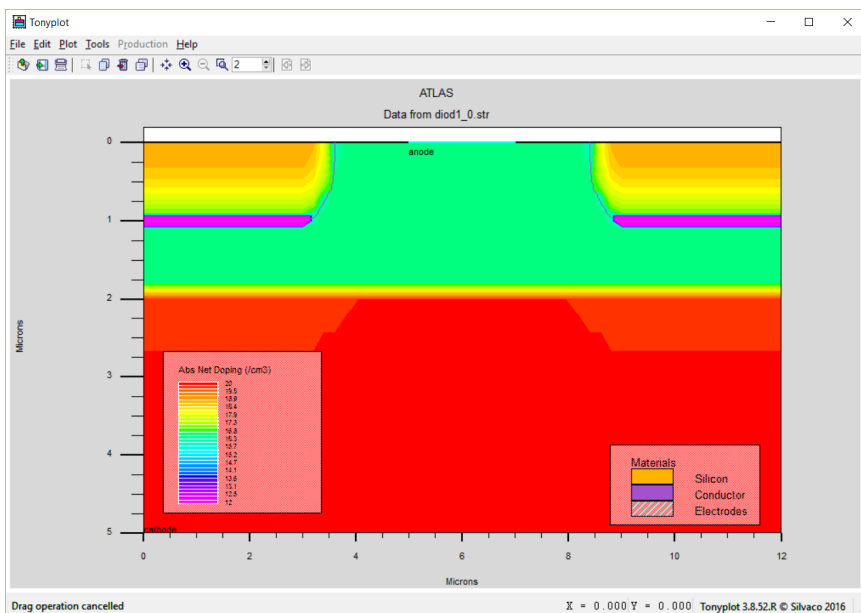


Рис.1

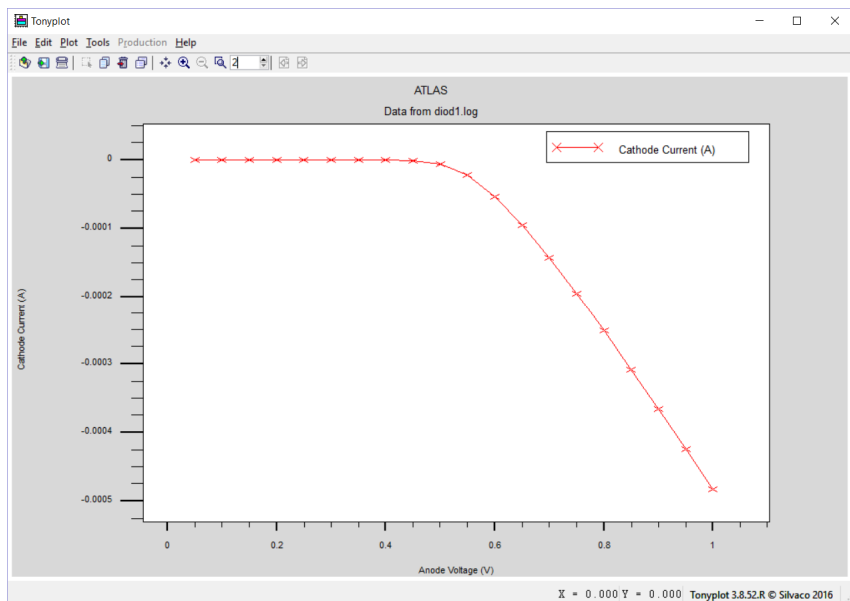


Рис.2

Задание: измените геометрические размеры охранного кольца таким образом, чтобы оно практически касалось электрода анода, пересчитайте структуру; уменьшите размеры области катода с 3 до 2 мкм, пересчитайте структуру.

2. Зависимость тока стока от напряжения затвор – исток в полевом транзисторе

В качестве примера использования базовых функций редакторов Athena и Atlas оптимальным вариантом исследования является построение кривой передаточной характеристики МОП транзистора. При моделировании прибора так же представлены программный расчет порогового напряжения и определение некоторых SPICE параметров структуры. Из кода можно определить:

- последовательность технологических операций для моделирования МОП транзистора в редакторе Athena,
- команды экстракции параметров структуры из ее модели (например, толщины оксида),

- технологию передачи информации о моделируемой структуре из редактора Athena в Atlas,
- принцип построения передаточной характеристики при напряжении сток-исток $V_{ds} = 0.01 \text{ В}$,
- команды экстракции данных из характеристики (пороговое напряжение V_t , линейный коэффициент усиления (β) и уменьшение подвижности носителей заряда (θ)).

Моделирование процесса в программном комплексе технологического моделирования Ssuprem 4 основано на стандартном процессе LDD (слаболегированный сток) МОП транзистора. Технологические операции приводятся в упрощенном виде. При расчетах используются модели, принятые в САПР по умолчанию. Поликремниевый затвор сформирован простым травлением областей заданной геометрии. Если перед этой операцией вывести график структуры на экран, моделирование будет представлено в виде одномерной структуры, на которой можно отображать распределения параметров структуры по толщине. После операции травления структура будет отображаться в виде двумерной структуры.

В данной задаче масштаб сетки, используемой при расчете, очень плотный. Но при этом команда **init ... spac.mult=3** уменьшает густоту ячеек сетки по осям X и Y в 3 раза. Обычно при моделировании МОП структуры параметр **spac.mult=1**.

При использовании автоматического перехода между расчетными пакетами в редакторе кода DeckBuild моделирование характеристик структуры будет передано в пакет моделирования приборов Atlas автоматически. Такая автоматическая переброска проекта позволяет проводить глобальную оптимизацию расчетов параметров и характеристик структуры из построенной модели.

Команда **extract** в конце файла позволяет рассчитывать толщину слоя оксида в заданной точке. По этому расчету можно проводить калибровку процесса при моделировании. Расчет сохраняется в файле **results.final**, расположенном в рабочей директории. Кроме того, результаты экстракции рассчитывае-

мых параметров отображаются в лог-листе во время моделирования.

В конце кода моделирования структуры задаются электроды. Наносится металлизация, в которой вытравливаются лишние области. Командой **electrode** определяются области металлизации и поликремния, которые будут использованы при расчете в Atlase.

Для моделирования характеристик прибора в Atlase первым делом происходит определение используемых моделей и параметров материалов. Команда **contact** позволяет задать работу выхода из электрода затвора, а команда **interface** определяет постоянную величину заряда на границе кремний – оксид кремния. При простом моделировании МОП транзистора модели инверсионной области Ломбарди (CVT, зависимость подвижности от поперечного и продольного полей, концентрации легирующей примеси и температуры) и Шоккли-Рида-Холла (SRH) берутся в качестве базовых для расчета. Для более точного моделирования характеристик структуры в моделирование необходимо добавлять эффект короткого канала и моделирование энергетического баланса структуры.

Команда **solve init** используется для моделирования при термическом равновесном состоянии. При последующих расчетах прикладываемые напряжения смещаются. При изменении прикладываемых напряжений первые точки смещения рекомендуется брать небольшими. После просчета системы при двух ненулевых значениях напряжения программа прогнозирует дальнейшее смещение прикладываемых напряжений относительно этих просчитанных точек. С использованием такой методики прогнозирования модели можно проводить расчеты при более высоких напряжениях. Если при заданных оператором начальных приближениях смещения напряжения редактор Atlas не может начать расчет с требуемой точностью, может быть использована команда **method trap**, которая уменьшает пользовательский шаг напряжения в два раза. По умолчанию эта опция активна.

Полезной особенностью данной модели является то, что здесь одновременно строится ВАХ, из которой извлекаются параметры.

Команды **solve** в коде задают величины напряжений на затворе при напряжении на стоке, равном 0.1 В. Эти решения строятся до 3 В с интервалом 0.25 В. Все характеристики и результаты моделирования сохраняются в файл *****.log** посредством команды **log**.

Команды **extract** в конце кода позволяют измерить пороговое напряжение и другие SPICE параметры структуры. Результаты экстракции выводятся в лог программы непосредственно во время моделирования и сохраняются в файл **results.final** для дальнейшего анализа. Используемый при экстракции синтаксис команды свободно собирается из операторов (например, максимального значения - **max**) и результатов моделирования (например, ток стока – **i."drain"**). Параметр **name** использует только те имена, которые были присвоены пользователем. Имена, зарезервированные программой, в данном случае не используются. Таким образом, в первом примере экстракции считываются: экстракция величины под названием **nvt**, которая определяется как пересечение с осью X максимального наклона зависимости напряжения на стоке от тока стока, из которого вычли половину напряжения на стоке. Этот метод является одним из вариантов расчета порогового напряжения.

Вторая экстракция определяет коэффициент усиления β . Он рассчитывается как значение самого сильного наклона зависимости $I_d(V_{gs})$, деленное на напряжение стока.

В последней экстракции определяется уменьшение подвижности носителей заряда θ (SPICE параметр 3 уровня). В используемом в примере синтаксисе берутся ссылки на посчитанные ранее (или заданные ранее) величины. Здесь это **"\$nvt"** и **"\$nbeta"**.

Расчет зависимости тока стока от напряжения затвор – исток в полевом транзисторе

```

go athena

# определение размеров структуры и масштаба сетки по
оси X
line x loc=0.0 spac=0.1
line x loc=0.2 spac=0.006
line x loc=0.4 spac=0.006
line x loc=0.6 spac=0.01
# определение размеров структуры и масштаба сетки по
оси Y
line y loc=0.0 spac=0.002
line y loc=0.2 spac=0.005
line y loc=0.5 spac=0.05
line y loc=0.8 spac=0.15
# начальные условия для моделирования: пластина –
кремний ориентацией (100), легирована фосфором в концен-
трации  $1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ;
# space.mul – множитель, который в 2 раза снижает
масштабирование сетки структуры, заданное выше
init orientation=100 c.phos=1e14 space.mul=2

# формирование кармана p-типа, в т.ч. маскирование об-
ласти n-типа
diffus time=30 temp=1000 dryo2 press=1.00 hcl=3
# травливание оксида толщиной 0.02 мкм
etch oxide thick=0.02

# имплантация области p-типа: загонка бора в дозе
 $8 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$  с энергией 100 КэВ с использованием модели Пир-
сона
implant boron dose=8e12 energy=100 pears
# диффузия имплантированной примеси при 950 °С в
течение 100 минут в атмосфере влажного кислорода с добавле-
нием HCl (hcl.pc=3 – 3 % HCl, может использоваться сокра-
щенная запись)
diffus temp=950 time=100 weto2 hcl=3

```

#имплантация области n-типа не приводится

технологический процесс формирования областей начинается в данного момента

первая стадия диффузии проводится в течение 50 минут при температуре 1000 °С, линейное изменение температуры до указанной величины составляет 4 °С/мин, атмосфера – сухой кислород, давление 0,1 атм., с добавлением HCl

diffus time=50 temp=1000 t.rate=4.000 dryo2 press=0.10
hcl=3

вторая стадия диффузии проводится в течение 220 минут при температуре 1200 °С в инертной среде с давлением 1 атм.

diffus time=220 temp=1200 nitro press=1

третья стадия диффузии длится 90 минут при температуре начиная с 1200 °С с линейным понижением температуры на 4,444 °С/мин, в инертной среде с давлением 1 атм.

diffus time=90 temp=1200 t.rate=-4.444 nitro press=1

после диффузии с поверхности кристалла стравливается весь окисел

etch oxide all

формирование промежуточного оксидного слоя

проводится диффузия в течение 20 минут при температуре 1000 °С в сухом кислороде при 1 атм. с добавлением HCl

diffus time=20 temp=1000 dryo2 press=1 hcl=3

стравливается весь выросший окисел

etch oxide all

выращивание подзатворного диэлектрика

диффузия в течение 11 минут при температуре 925 °С в сухом кислороде

diffus time=11 temp=925 dryo2 press=1.00 hcl=3

экстракция параметра схемы – толщины окисла;
mat.occno = 1 – первая (верхняя) область выбранного материала, по оси X точка измерения = 0.05 мкм
extract name="gateox" thickness oxide mat.occno=1
x.val=0.05

ионная имплантация бора в количестве $9.5 \cdot 10^{11}$ см⁻³ с энергией 10 КэВ методом Пирсона
implant boron dose=9.5e11 energy=10 pearson

нанесение поликремния толщиной 0.2 мкм; вертикальных делений сетки в нанесенном слое – 10 шт.
depo poly thick=0.2 divisions=10

с этого места отображение структуры на графике будет проводиться в 2D режиме автоматически

стравливание прямоугольной области поликремния слева от точки, заданной координатой p1 по оси x; если должна быть стравлена непрямоугольная область, то используются координаты p2; области могут быть заданы как left/right/above/below; направления травления – по осям X и Y
etch poly left p1.x=0.35

для процесса диффузии используется принятая по умолчанию модель Ферми, для окисления – компрессионная модель (аналог гидродинамического течения вещества)

method fermi compress
diffuse time=3 temp=900 weto2 press=1.0

имплантация фосфора
implant phosphor dose=3.0e13 energy=20 pearson

нанесение окисла
depo oxide thick=0.120 divisions=8

стравливание оксида без подтравливания скрытых областей (dry etch - стравливание заданной толщины материала, не закрытого маской)

etch oxide dry thick=0.120

```

# имплантация мышьяка
implant arsenic dose=5.0e15 energy=50 pearson
# модель Ферми для диффузии и компрессионная мо-
дель для окисления
method fermi compress
diffuse time=1 temp=900 nitro press=1.0

# нанесение областей металлических контактов для ис-
тока/стока
etch oxide left p1.x=0.2
deposit alumin thick=0.03 divisions=2
etch alumin right p1.x=0.18

# извлечение параметров транзистора
# определение глубины залегания первого p-n перехода
(junc.occno=1) в кремнии
extract name="nxj" xj silicon mat.occno=1 x.val=0.1
junc.occno=1

# определение слоевого сопротивления областей n++ в
кремнии в координате по оси X = 0.05 мкм; region.occno –
определяет номер выбранной области (и прикладываемые к ней
условия // напр. напряжение)
extract name="n++ sheet rho" sheet.res material="Silicon"
mat.occno=1 x.val=0.05 region.occno=1

# определение слоевого сопротивления слаболегирован-
ного стока (LDD) под спейсером
extract name="ldd sheet rho" sheet.res material="Silicon"
mat.occno=1 x.val=0.3 region.occno=1

#определение поверхностной концентрации под обла-
стью канала
extract name="chan surf conc" surf.conc impurity="Net
Doping" material="Silicon" mat.occno=1 x.val=0.45

```

экстракция зависимости проводимости поликремния от наклона кривой в точке по оси $X = 0.45$ мкм на первом p-n переходе; подаваемое напряжение меняется от 0 до 2 В с шагом 0.2; 1dn.*** – указывает на одномерную структуру n-типа; bias – наклон кривой напряжения – ось X, 1dn.conduct – проводимость – ось Y

```
extract start material="Polysilicon" mat.occno=1 bias=0.0
bias.step=0.2 bias.stop=2 x.val=0.45
extract      done      name="sheet      cond      v      bias"
curve(bias,1dn.conduct material="Silicon" mat.occno=1 re-
gion.occno=1)
outfile="extract.dat"
```

определение порогового напряжения одномерной структуры n-типа с длинным каналом; напряжение подложки = 0; поверхностный заряд $QSS = 10^{10} \text{ см}^2$

```
extract name="n1dvt" 1dvt ntype vb=0.0 qss=1e10
x.val=0.49
```

построенная модель структуры отзеркаливается справа
structure mirror right

определение имен и областей контактов затвора, истока, стока и подложки

```
electrode name=gate x=0.5 y=0.1
electrode name=source x=0.1
electrode name=drain x=1.1
electrode name=substrate backside
# выходной файл структуры
structure outfile=mos01_0.str
# plot the structure
tonyplot mos01_0.str -set mos01_0.set
```

Исследование характеристик транзистора; проверка порогового напряжения, определение β и θ
go atlas

```

# задание моделей инверсионной области Ломбарди
(CVT) и Шоккли-Рида-Холла (SRH)
# команда «print» выводит в лог-файл значения задан-
ных пользователем переменных при их пересчете в цикле
models cvt srh print
# контакт затвора сформирован из поликремния n-типа
# плотность поверхностного заряда на границе с поли-
кремнием равна  $3 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ 
contact name=gate n.poly
interface qf=3e10
# в качестве метода численного расчета выбран метод
Ньютона (используется по умолчанию)
method newton
# если до какого-то момента расчеты характеристик
структуры не проводились, для первого приближения потенци-
ала и концентрации носителей заряда используются оценочные
величины, определенные программой из профиля легирования
кристалла; первый расчет проводится при нулевом смещении
потенциала
solve init

# задаем наклон кривой тока напряжением сток-исток
0.1 V
solve vdrain=0.1

# смещение напряжения на затворе от 0 до 3 В с шагом
0.25 V
# команда «master» означает, что будет сформирован
стандартный файл структуры, основанный на моделировании с
помощью программного комплекса Ssuprem3 и одномерного
редактора Athena 1D
# сохранение файла структуры
log outf=mos01_1.log master
solve vgate=0 vstep=0.25 vfinal=3.0 name=gate
save outf=mos01_1.str

```

```

# построение графиков
tonyplot mos01_1.log -set mos01_1_log.set

# определение характеристик транзистора: порогового
напряжения,  $\beta$  и  $\theta$ 
extract                                name="nvt"                (xinter-
cept(maxslope(curve(abs(v."gate"),abs(i."drain")))))      -
abs(ave(v."drain"))/2.0)
extract                                name="nbeta"
slope(maxslope(curve(abs(v."gate"),abs(i."drain")))))      *
(1.0/abs(ave(v."drain")))
extract    name="ntheta"    ((max(abs(v."drain")))      *
$("nbeta")/max(abs(i."drain"))) - (1.0 (max(abs(v."gate"))) -
($"nvt"))

quit

```

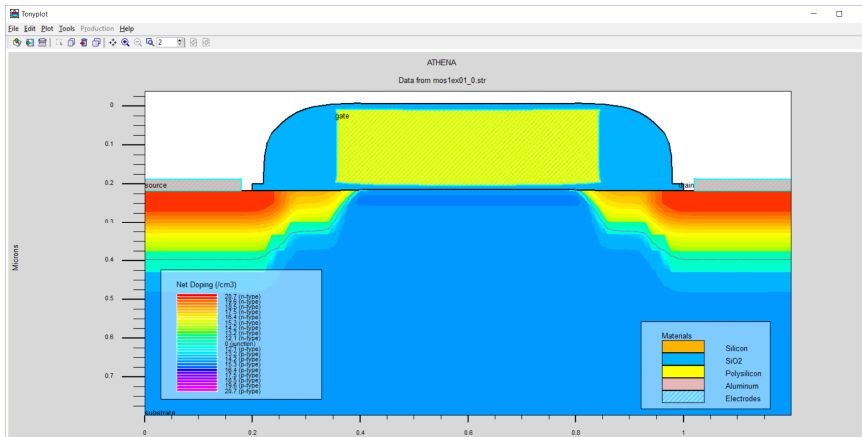


Рис.3

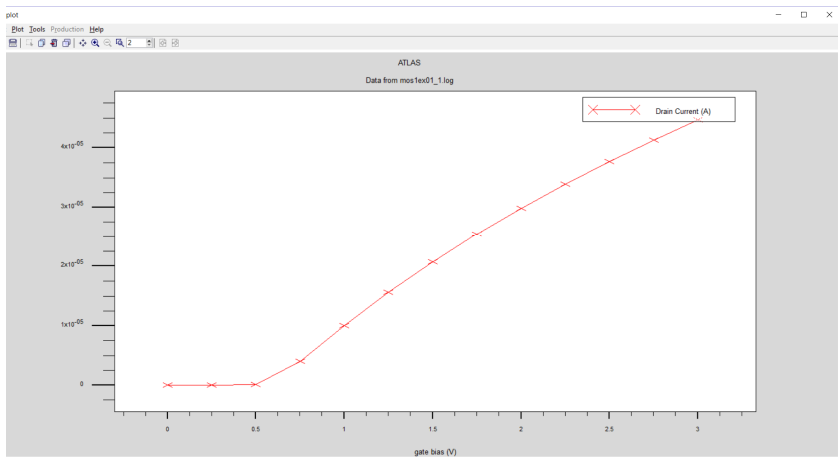


Рис.4

Задание: выведите на экран все этапы проектирования транзистора, проследите, как после каждой операции меняется структура, как распределяется примесь.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

Знакомство с редакторами Athena и Atlas. Исследование базовых компонентов полупроводниковой технологии: МОП и биполярного транзистора

1. Семейство выходных характеристик МОП транзистора

В коде примера показано моделирование семейства выходных характеристик классического МОП транзистора. Из модели структуры определяются максимальный ток стока и насыщение. Основные этапы моделирования:

- создание структуры МОП транзистора в редакторе Athena,
- извлечение параметров структуры (например, толщины окисла),
- построение семейства выходных характеристик транзистора при напряжениях на затворе 1.1, 2.2 и 3.3 В,
- определение максимального тока стока и насыщения из кривых.

Три зависимости тока стока от напряжения сток-исток строятся при трех разных напряжениях на затворе. В первой части расчета задаются начальные приближения для этих трех кривых. Для каждого из трех напряжений на затворе сначала используется решение при $V_{ds} = 0$ В (результаты сохраняются в промежуточный файл).

Далее каждый из трех промежуточных решений передается в редактор Atlas. Открывается лог-файл и задаются параметры изменения напряжений сток-исток. При подгрузке лог-файла значения напряжений в нем меняются на значения из Atlas.

Экстракция в конце моделирования позволяет определить максимальный ток стока и насыщение. Насыщение считается из семейства выходных кривых, как минимальное изменение по кривой.

go athena

определение геометрических размеров и масштаба
сетки моделирования по оси X

line x loc=0 spac=0.1

line x loc=0.2 spac=0.006

line x loc=0.4 spac=0.006

line x loc=0.5 spac=0.01

определение геометрических размеров и масштаба
сетки моделирования по оси Y

line y loc=0.00 spac=0.002

line y loc=0.2 spac=0.005

line y loc=0.5 spac=0.05

line y loc=0.8 spac=0.15

в качестве исходной подложки для изготовления тран-
зистора выбрана пластина кремния n-типа, ориентацией (100),
легированная фосфором в концентрации 10^{14} см^{-3}

для более простых расчетов масштабирование сетки
пластины умножается на 2

init orientation=100 c.phos=1e14 space.mul=2

формирование области p-типа (предполагается, что
проходит в кармане n-типа, моделирование которого не пока-
зано)

выращивание оксидного слоя окислением пластины в
течение 30 минут при температуре 1000 °C в сухом кислороде

давление в диффузионной камере 1 атм., в поток газа
добавлено 3 % HCl

diffus time=30 temp=1000 dryo2 press=1.00 hcl=3

#стравливание оксида толщиной 0.02 мкм

etch oxide thick=0.02

имплантация бора для создания кармана p-типа

доза внедряемой примеси $8 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, энергия загонки
100 КэВ, метод загонки – по распределению Пирсона

implant boron dose=8e12 energy=100 pears

разгонка примеси вглубь структуры одновременно с
формированием окисла на поверхности методом диффузии при

температуре 950 °C в течение 100 минут в среде влажного кислорода с добавлением 3 % HCl

diffus temp=950 time=100 weto2 hcl=3

формирование кармана n-типа не моделируется

процесс диффузии с градиентом температуры

в течение 50 минут в сухом кислороде происходит нагрев от 1000 °C со скоростью 4 °C/мин, давление в камере 0.1 атм., 3 % HCl

diffus time=50 temp=1000 t.rate=4.000 dryo2 press=0.10
hcl=3

далее процесс стабилен в течение 220 минут в азотной среде (давление 1 атм.), температура 1200 °C

diffus time=220 temp=1200 nitro press=1

далее температура снижается в течение 90 минут со скоростью 4.444 °C/мин

diffus time=90 temp=1200 t.rate=-4.444 nitro press=1

стравливается весь выросший окисел

etch oxide all

наращивание «чистящего» окисла в течение 20 минут при температуре 1000 °C в сухом кислороде

diffus time=20 temp=1000 dryo2 press=1 hcl=3

стравливается весь выросший окисел

etch oxide all

выращивание подзатворного диэлектрика

diffus time=11 temp=925 dryo2 press=1.00 hcl=3

команда на определение толщины подзатворного диэлектрика в точке 0.5 мкм по оси X

extract name="gateox" thickness oxide mat.ocno=1
x.val=0.50

имплантация бора для формирования заданного порогового напряжения

```

implant boron dose=9.5e11 energy=10 pearson
# нанесение поликремния толщиной 0.2 мкм, в слое со-
зданы 10 делений сетки
depo poly thick=0.2 divi=10

# с данного шага отображение структуры будет проис-
ходить в 2D режиме
# стравливание поликремния слева от точки 0.35 мкм по
оси X
etch poly left p1.x=0.35
# для процесса диффузии используется принятая по
умолчанию модель Ферми, для окисления – компрессионная
модель (аналог гидродинамического течения вещества)
# окисление проводится в течение 3 минут при темпера-
туре 900 °C в атмосфере влажного кислорода при 1 атм.
method fermi compress
diffuse time=3 temp=900 weto2 press=1.0
# имплантация фосфора в дозе  $3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$  с энергией 20
КэВ методом Пирсона
implant phosphor dose=3.0e13 energy=20 pearson
# нанесение окисла толщиной 0.12 мкм (8 делений сетки
в слое)
depo oxide thick=0.120 divisions=8
# стравливание окисла той же толщины, нанесенного
ранее
etch oxide dry thick=0.120
# имплантация мышьяка в дозе  $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  с энергией 50
КэВ методом Пирсона
implant arsenic dose=5.0e15 energy=50 pearson
# для процесса диффузии используется принятая по
умолчанию модель Ферми, для окисления – компрессионная
модель (аналог гидродинамического течения вещества)
method fermi compress
diffuse time=1 temp=900 nitro press=1.0

etch oxide left p1.x=0.2

```

```
deposit alumin thick=0.03 divi=2
etch alumin right p1.x=0.18
```

```
# экстракция параметров схемы
# определение глубины залегания верхнего p-n перехода
extract name="nxj" xj silicon mat.occno=1 x.val=0.1
junc.occno=1
```

```
# определение порогового напряжения при известных
параметрах: потенциал подложки 0.2 В, структура n-типа,
плотность поверхностного заряда QSS ( $\text{см}^{-3}$ ), в точке по оси X
0,49 мкм
```

```
extract name="nldvt" ldvt ntype vb=0.0 qss=1e10
x.val=0.49
```

```
# экстракция зависимости проводимости поликремния
от наклона кривой в точке по оси X = 0.45 мкм на первом p-n
переходе; подаваемое напряжение меняется от 0 до 2 В с шагом
0.2; 1dn.*** – указывает на одномерную структуру n-типа; bias
– наклон кривой напряжения – ось X, 1dn.conduct – проводи-
мость – ось Y
```

```
extract start material ="Polysilicon" mat.occno=1 bias=0.0
bias.step=0.2 bias.stop=2 x.val=0.45
extract done name="sheet cond v bias"
curve(bias,1dn.conduct material="Silicon" mat.occno=1 re-
gion.occno=1) outfile="extract.dat"
```

```
# определение слоевого сопротивления n++ областей
extract name="n++ sheet rho" sheet.res material="Silicon"
mat.occno=1 x.val=0.05 region.occno=1
```

```
# определение слоевого сопротивления области стока
LDD
```

```
extract name="ldd sheet rho" sheet.res material="Silicon"
mat.occno=1 x.val=0.3 region.occno=1
```

```
# определение поверхностной концентрации в канале
extract name="chan surf conc" surf.conc impurity="Net
Doping" material="Silicon" mat.occno=1 x.val=0.45
```

```
structure mirror right
```

```
electrode name=gate x=0.5 y=0.1
electrode name=source x=0.1
electrode name=drain x=0.9
electrode name=substrate backside
```

```
structure outfile=mos1_0.str
tonyplot -st mos1_0.str -set mos1_0.set
```

```
go atlas
```

```
# задание работы выхода из затвора
contact name=gate n.poly
```

```
# задание плотности поверхностных состояний на затворе Qss
interface qf=3e10
```

```
# задание моделей инверсионной области Ломбарди
(CVT, зависимость подвижности от поперечного и продольного
полей, концентрации легирующей примеси и температуры) и
Шоккли-Рида-Холла, numcarr – количество носителей заряда,
climit – минимальная концентрация носителей заряда, maxtrap –
максимальное количество пересчетов в уравнении баланса фотонов
```

```
models cvt srh print numcarr=2
method climit=1e-4 maxtrap=10
```

```
# задание смещений на затворе при Vds = 0 В
solve init
solve vgate=1.1 outf=solve_tmp1
```

```

solve vgate=2.2 outf=solve_tmp2
solve vgate=3.3 outf=solve_tmp3

# загрузка информации по напряжениям на затворе в
блок расчета при изменяющемся Vds
load infile=solve_tmp1
log outf=mos1_1.log
solve name=drain vdrain=0 vfinal=3.3 vstep=0.3

load infile=solve_tmp2
log outf=mos1_2.log
solve name=drain vdrain=0 vfinal=3.3 vstep=0.3

load infile=solve_tmp3
log outf=mos1_3.log
solve name=drain vdrain=0 vfinal=3.3 vstep=0.3

# определение максимального тока и степени насыще-
ния
extract name="nidsmax" max(i."drain")
extract name="sat_slope" slope(minslope(curve(v."drain",
i."drain"))))

tonyplot -overlay -st mos1_1.log mos1_2.log mos1_3.log -
set mos1_1.set

quit

```

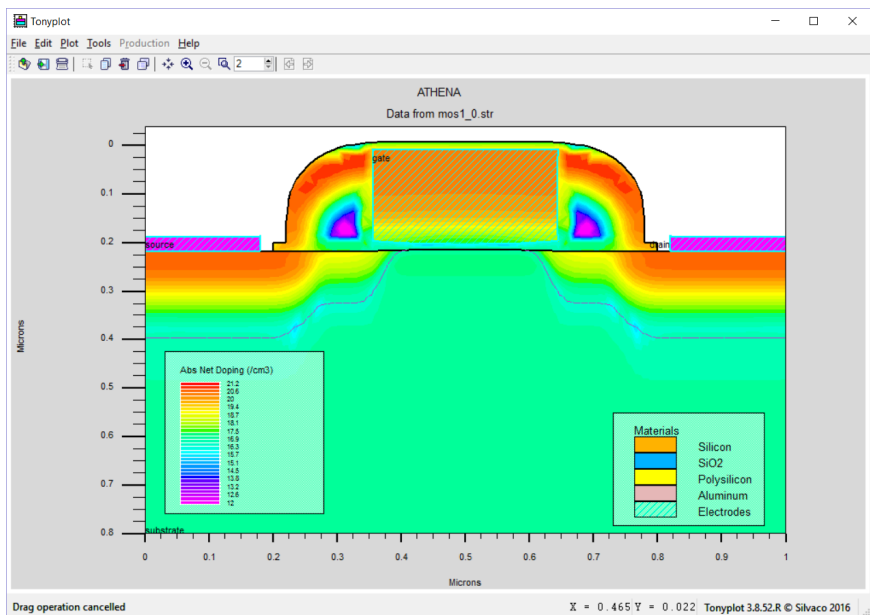


Рис.5

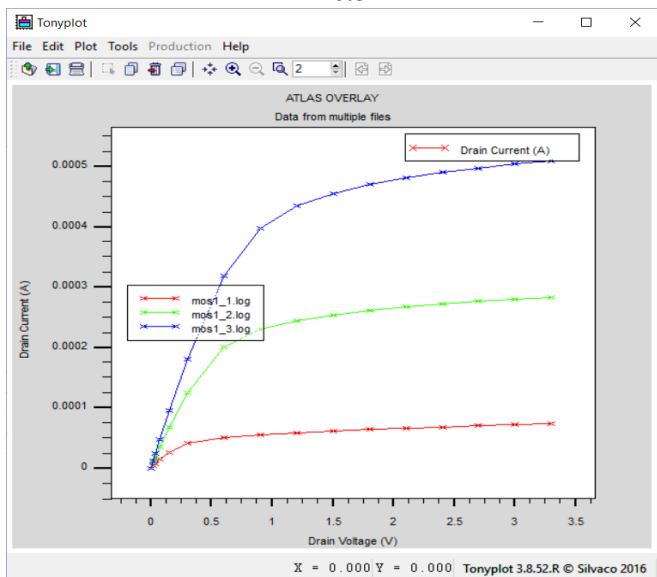


Рис.6

Задание: выведите на экран все этапы проектирования транзистора, проследите, как после каждой операции меняется структура, как распределяется примесь.

2. Анализ NPN транзистора с 2 контактами к базе

В данном коде моделирования технологии изготовления биполярного транзистора создается прибор с двумя симметричными областями базы, сформированными внедрением примеси. Сначала создается биполярная структура с поликремниевым эмиттером. Далее в структуре перестраивается сетка расчета. Задаются электроды базы (объединятся в один). Напряжение на базе меняется, а на коллекторе постоянно.

Электроды *base* и *base1* задаются в редакторе Athena, а затем объединяются командой **contact name=base common=base1** в Atlase. Это позволяет использовать одно имя базы при определении параметров структуры.

```
go Athena
```

```
# изготовление биполярного транзистора с поликремниевым эмиттером
```

```
line x loc=0.0 spacing=0.03
line x loc=0.2 spacing=0.02
line x loc=0.24 spacing=0.015
line x loc=0.3 spacing=0.015
line x loc=0.8 spacing=0.15
```

```
line y loc=0.0 spacing=0.01
line y loc=0.07 spacing=0.01
line y loc=0.1 spacing=0.01
line y loc=0.12 spacing=0.01
line y loc=0.3 spacing=0.02
line y loc=0.5 spacing=0.06
line y loc=1.0 spacing=0.35
```

в качестве исходной пластины выбрана подложка из кремния ориентацией (100) с примесью мышьяка $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$
init c.arsenic=2e16

имплантация бора с энергией 18 КэВ в дозе $2.5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$

implant boron energy=18 dose=2.5e13

разгонка диффузией в течение 60 минут при температуре 920 °C

diffuse time=60 temp=920

нанесение поликремния толщиной 0.3 мкм (6 делений сетки в слое), минимальное расстояние между точками на поверхности 0.05 мкм

deposit poly thick=0.3 divisions=6 min.space=0.05

имплантация для легирования поликремния

implant arsenic dose=7.5e15 energy=50

формирование структуры заданной формы из поликремния методом травления области справа от точки 0.2 мкм на оси X

etch poly right p1.x=0.2

изменение масштаба сетки в прямоугольной области влево от точки на оси X и вниз от точки на оси Y

relax y.min=.2 x.min=0.2

relax y.min=.2 x.min=0.2

method compress fermi

diffuse time=25 temp=920 dryo2

diffuse time=50 temp=900 nitrogen

implant boron dose=2.5e13 energy=18

нанесение разделителя – слоя окисла толщиной 0.4 мкм

deposit oxide thick=0.4 divisions=10 min.space=0.1

```

# стравливание поверхности окисла
etch oxide dry thick=0.5

implant boron dose=1e15 energy=30
diffuse time=60 temp=900 nitrogen

# нанесение алюминия и стравливание лишних областей
для формирования контактов
deposit alum thick=0.05 div=2

etch alumin start x=0.15 y=-10
etch continue x=0.15 y=10
etch continue x=0.6 y=10
etch done x=0.6 y=-10

# отражение и «растягивание» структуры
structure reflect left
stretch stretch.val=0.1 x.val=0.0

# название электродов для передачи расчета в Atlas
electrode x=0.0 name=emitter
electrode x=-0.7 name=base
electrode backside name=collector
electrode x=0.7 name=base1

structure outfile=bjt1_0.str

go atlas
# задание модели для расчета материалов структуры и
параметров контактов (taun – время жизни электронов, таup –
время жизни дырок)
material taun0=5e-6 таup0=5e-6
contact name=emitter n.poly surf.rec
contact name=base1 common=base short

```

```

# команда для подключения расчета моделей биполяр-
ного транзистора
models bipolar print

# начало расчета
solve init

# подключение расчета по двум носителям заряда
method newton autonr trap
solve prev

# задание смещения коллектора
solve vcollector=2 local

# задание смещения базы
solve vbase=0.1

# смещение базы до 0.9 В с шагом 0.05 В
log outf=bjt1_2.log master
solve vbase=0.2 vstep=0.05 vfinal=0.9 name=base ac
freq=1e6 aname=base

output e.field flowlines jx.el jx.ho jy.el jy.ho
save outf=bjt1_3.str

# определение параметров транзистора: максимального
тока коллектора, максимального отношения тока коллектора к
току базы, максимальное время срабатывания
extract name="peak collector current"
max(curve(abs(v."base"),abs(i."collector"))))
extract name="peak gain" max(i."collector"/ i."base")
extract name="max fT"
max(g."collector""base"/(2*3.1415*c."base""base"))

tonyplot bjt1_2.log -set bjt1_2.set

```

quit

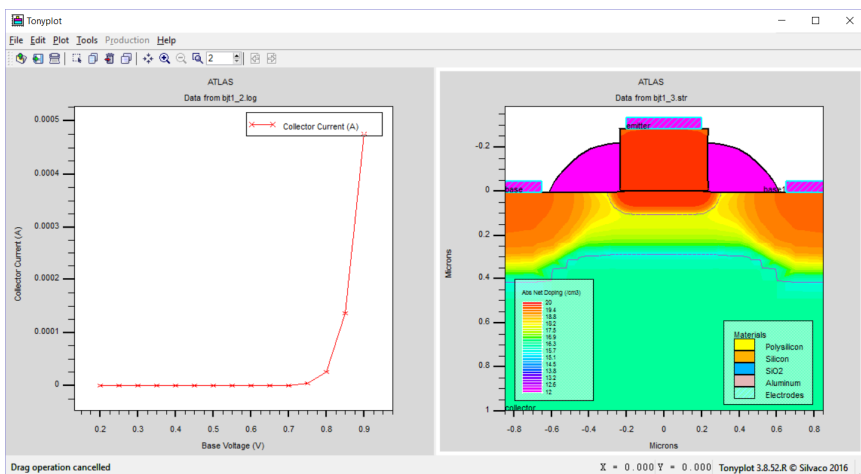


Рис.7

Задание: выведите на экран все этапы проектирования транзистора, проследите, как после каждой операции меняется структура, как распределяется примесь.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

Технологические особенности процесса диффузии (часть 1)

Высокотемпературная **диффузия** основана на перераспределении частиц одного вещества в другом в направлении убывания их концентрации. Скорость диффузии, определяемая подвижностью диффундирующих в кристаллической решетке полупроводника атомов, зависит от идеальности их расположения в реальном кристалле, а также от выбранного кристаллографического направления.

В реальных кристаллах существуют три основных механизма диффузии: взаимным замещением атомов; по междоузлиям; по вакансиям. Основные электрически активные примеси образуют в полупроводнике твердые растворы замещения (бор и фосфор в кремнии), диффузия в которых может происходить одновременно тремя способами, однако преобладают два последних, так как при них энергия активации ниже.

Влияние на скорость диффузии оказывает наличие примеси в исходной подложке. Дислокации ускоряют процесс диффузии.

Моделирование диффузии из ограниченного источника примеси проходит в две стадии. Вначале в верхнем слое подложки формируется область с заданной концентрацией примеси N_0 . Затем на поверхность подложки наносится слой, коэффициент диффузии примеси в котором меньше, чем в подложке (окисел на кремнии), и структура нагревается. Происходит диффузия примеси вглубь пластины, поверхностная концентрация N_0 уменьшается.

Диффузию обычно проводят при температурах от 1000 до 1300°C, так как при более низких температурах коэффициенты диффузии очень малы и р-п переход расположен практически на поверхности, а при более высоких – качество диффузионных слоев резко ухудшается и снижается стойкость кварцевого реактора.

Окисление проводится в диффузионной печи диффузией кислорода через слой окисла и дальнейшим взаимодействием с подложкой.

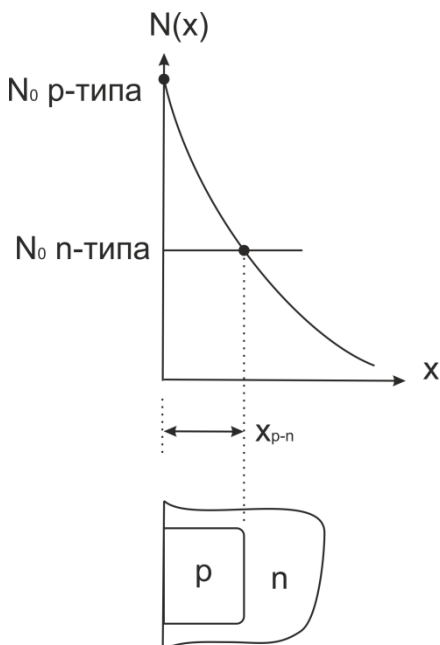


Рис.8

Настройки моделирования процесса диффузии: diffuse

Параметры, определяющие процесс диффузии:

time=<n> [hours | minutes | seconds]

temperature=<n> [t.final=<n>|t.rate=<n>]

Параметры, определяющие диффузионную среду:

[dryo2 | weto2 | nitrogen | inert] [hcl.pc=<n>] [pressure=<n>]

[f.o2=<n> | f.h2=<n> | f.h20=<n> | f.n2=<n> | f.hcl=<n>]

[c.impurities=<n>]

Параметры, относящиеся к выходному файлу процесса:
[dump][dump.prefix=<c>] [tsave=<n>] [tsave.mult=<n>]

Параметры, относящиеся к файлам моделей диффузии:
[b.mod=<c>] [p.mod=<c>] [as.mod=<c>] [ic.mod=<c>]
[vi.mod=<c>]

Дополнительные параметры:
[no.diff] [reflow]

time – параметр определяет время диффузии (по умолчанию – в минутах, можно задать в часах или секундах),

temperature – температура процесса диффузии в °C в диапазоне от 700 до 1200 °C; при выходе процесса за указанные пределы при моделировании может потребоваться пересчет коэффициента диффузии,

t.final – конечное значение температуры при неизотермическом процессе диффузии (синоним t.stop),

t.rate – шаг изменения температуры при неизотермическом процессе диффузии (°C/минуты),

dryo2, weto2, nitrogen, inert – параметр определяет тип среды при диффузии: сухой кислород, влажный кислород, азот (синоним – инертная среда),

hcl.pc – процент HCl в потоке газа при диффузии,

pressure – парциальное давление среды (атм.),

f.o2, f.h2, f.h2o, f.n2, f.hcl – параметры позволяют задавать доли компонентов в диффузионной среде,

c.impurities – концентрация примеси в смеси газов (см⁻³),
загонка примеси в диффузионной печи осуществляется командой «**c.boron=5e15**» для 5×10^{15} см⁻³ бора в диффузионной камере печи.

(см. стр. 307-308 в Athena_users_1)

1. Операции загонки и отжига в процессе диффузии бора

В коде примера использованы процессы имплантации для загонки примеси и отжига в качестве разгонки. Из-за того, что при имплантации не используется маскирование структуры, для построения характеристики можно использовать 1D структуру в редакторах **Athena** и **SSuprem 4**.

На второй стадии диффузии (при разгонке) заданное количество имплантированной примеси отжигается в инертной атмосфере по модели диффузии Ферми (задана по умолчанию, раздел 3.1.2 в инструкции к редактору Athena).

После завершения расчета диффузии в редакторе **TonyPlot** строится 1D «срез» полученной структуры.

```
go athena
```

```
#Двухстадийный процесс диффузии бора в кремниевую подложку
```

```
#задание геометрических размеров структуры и делений сетки по оси X
```

```
line x loc = 0.0 spacing=0.1
```

```
line x loc = 0.1 spacing=0.1
```

```
# задание геометрических размеров структуры и делений сетки по оси Y
```

```
line y loc = 0 spacing = 0.02
```

```
line y loc = 2.0 spacing = 0.20
```

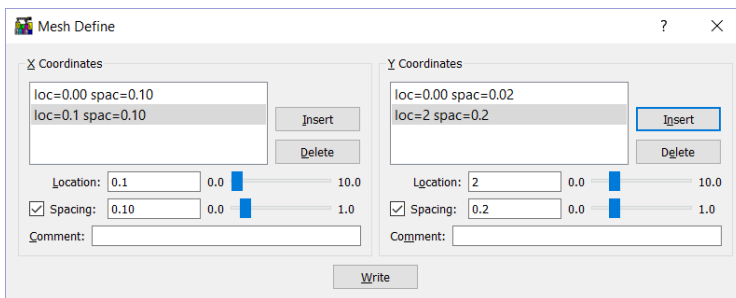


Рис.9

```
#инициализация сетки для кремниевой структуры за-
данной ориентации
#c заданным количеством примеси
```

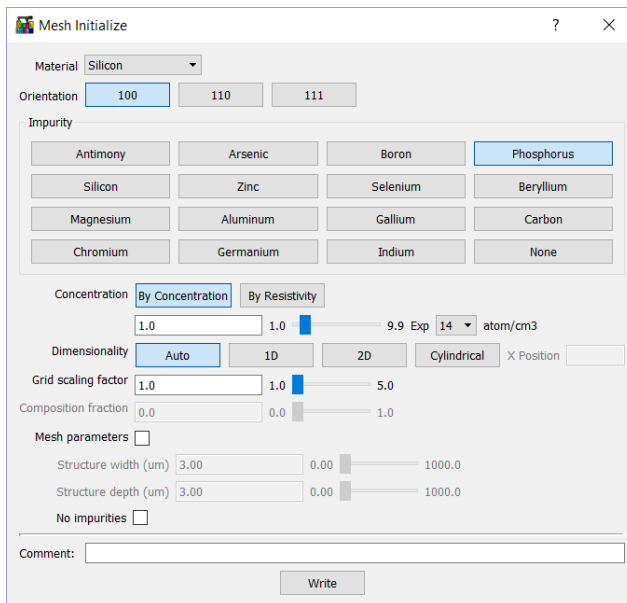


Рис.10

```
init silicon c.phos=1.0e14
```

```
# равномерная имплантация бора в заданном количестве
# с заданной энергией загонки
```

для процесса можно задать угол наклона подложек и вращение,

а также структуру (аморфную или кристаллическую) и модель имплантации

implant boron dose=1e13 energy=70

Process Implant

Impurity

☒ Boron ☐ Phosphorus ☐ Arsenic ☐ BF2

☐ Antimony ☐ Silicon ☐ Zinc ☐ Selenium

☐ Beryllium ☐ Magnesium ☐ Aluminum ☐ Gallium

☐ Carbon ☐ Indium

Dose: 1.0 exp 13 ions/cm2 Energy: 70 KeV

Model

☒ Dual Pearson ☐ Monte carlo

☐ Gauss

☐ Full lateral

Tilt: 7 degrees

Rotation: 0 degrees ☐ Continual rotation

Material type

☒ Crystalline ☐ Amorphous

Damage

☐ Point defects ☐ <311> Clusters ☐ Dislocation loops

Scaling factor: 1.00

Min cluster thresh: 1.0 exp 17

Max cluster thresh: 1.5 exp 19

Cluster scaling: 1.40

Min loop conc: 1.0 exp 17

Max loop conc: 1.0 exp 18

Comment:

Write

Рис.11

#диффузия имплантированной примеси для процесса можно задавать атмосферу (сухой или влажный кислород, азот, смесь газов) и давление газа, дополнительную примесь и модель диффузии

diffuse time=30 temperature=1000

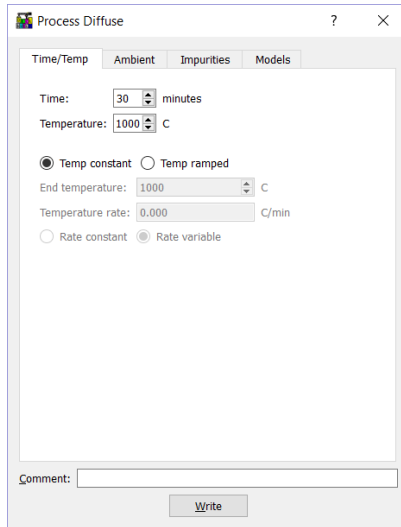


Рис.12

определение глубины залегания первого р-п перехода
в кремнии в одномерной структуре на срезе по оси X в точке 0;
.осно – от слова occurrence / появление / возникновение

```
extract name="xj" xj silicon mat.occno=1 x.val=0.0
junc.occno=1
```

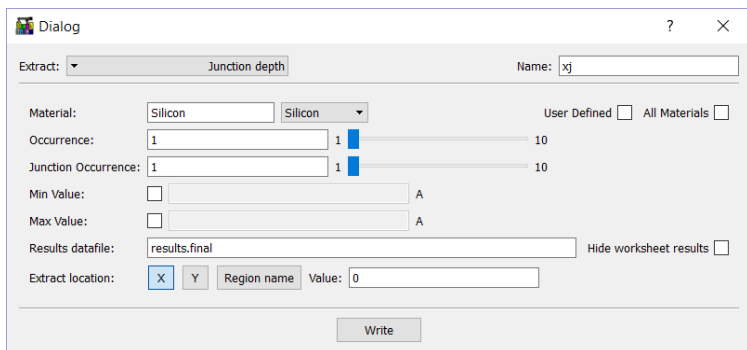


Рис.13

```

#создание файла для сохранения рассчитанной структу-
ры
structure outfile=1.str

# построение финального графика
tonyplot 1.str

quit

```

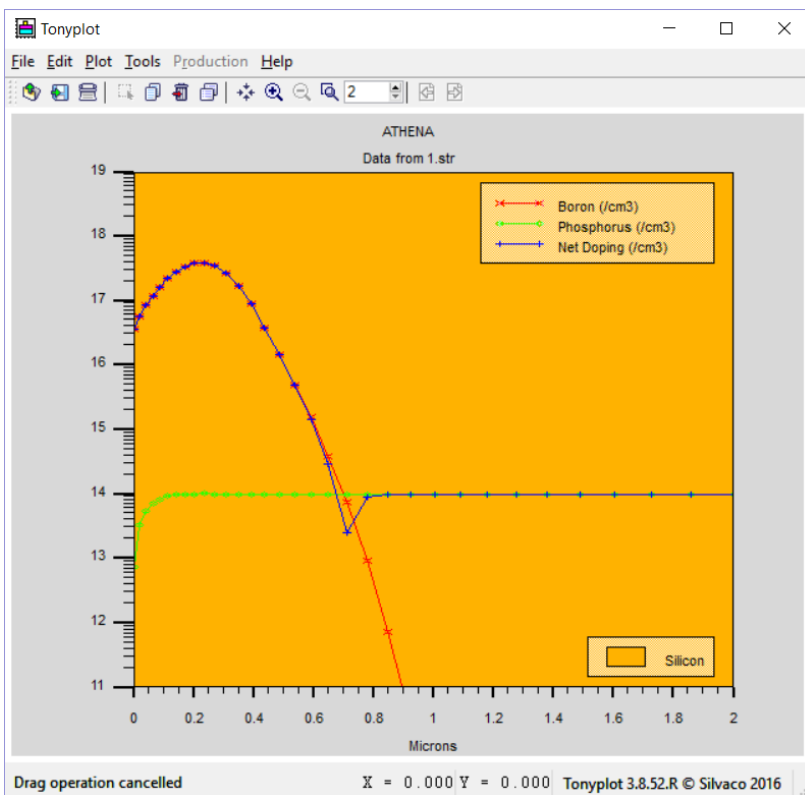


Рис.14

Задание: на основе имеющегося кода структуры создайте еще один p-n переход (как для формирования областей биполярного транзистора). Отредактируйте процессы диффузии и

отжига таким образом, чтобы р-п переходы стали более резкими.

Извлеките:

толщину кремния в структуре

концентрацию примеси на поверхности образца

максимальную концентрацию примеси на первом р-п переходе в кремнии

максимальную концентрацию фосфора и бора в структуре

минимальную концентрацию бора по всем р-п переходам верхнего слоя кремния

Примеры технологии экстракции приведены в описании к **deckbuild** стр. 150.

2. Двухстадийная диффузия индия

Код проекта использует имплантацию и диффузию индия в кремний. В примере используется модель Ферми при разгонке заданного количества примеси при высокой температуре.

При имплантации используется модель Монте-Карло, которая является более точной, чем таблицы стандартных величин.

go athena

#Двухстадийная диффузия индия

задание геометрических размеров структуры и делений сетки по оси X

line x loc = 0.0 spacing=0.1

line x loc = 0.1 spacing=0.1

задание геометрических размеров структуры и делений сетки по оси Y

line y loc = 0 spacing = 0.01

line y loc = 1.0 spacing = 0.05

```
#инициализация сетки для кремниевой структуры за-
данной ориентации с заданным количеством примеси
init silicon c.phos=1.0e14
```

```
#имплантация индия
```

Рис.15

```
implant indium dose=1e13 energy=70 n.ion=20000 monte
sampling
structure outfile = 2_0.str remove.gas
```

REMOVE.GAS обозначает ситуацию, что в структуре, записанной в выходной файл, газовая среда не учитывается. Газовая среда автоматически добавляется в технологию разрабатываемой структуры при травлении в методе Монте-Карло и в аппроксимации методом кулоновских столкновений.

```
#диффузия примеси в структуру
diffuse time=30 temperature=1000
```

```
# экстракция места расположения p-n перехода
extract name="xj" xj silicon mat.occno=1 x.val=0.0
junc.occno=1
```

```
# создание файла сохраненной структуры
structure outfile=2_1.str
```

```
tonyplot -overlay 2_0.str 2_1.str -set 2.set
```

-set <file> дает редактору TonyPlot команду на загрузку файла и восстановление изображения на графике, которое было ранее. Установка файла используется для всех файлов, загруженных к тому времени в проекте, т.е. все файлы, которые прошли выполнение к данному моменту. Если надо подключить 3 графика, прописываем их после `-overlay` и в конце ставим `-set 2.set`, где 2 – название файла.

```
quit
```

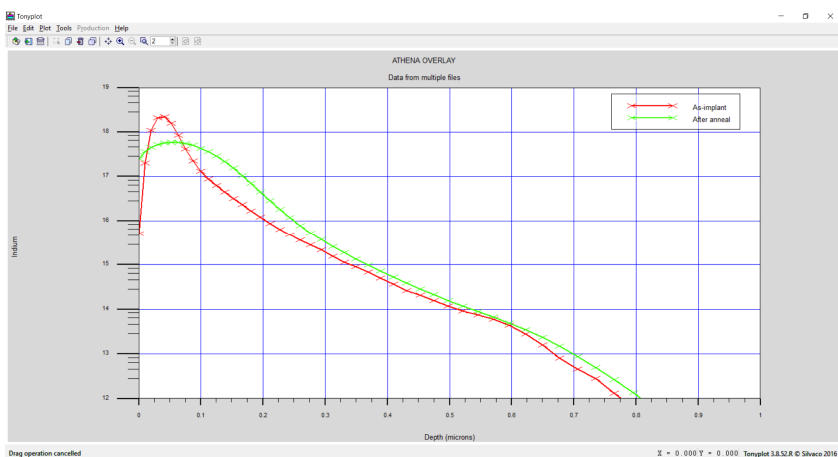


Рис.16

Задание: на основе имеющегося кода структуры создайте еще один p-n переход, сделайте отжиг примеси и постройте семейство из 4 зависимостей распределения концентрации индия и фосфора до и после отжига.

3. Окисление при ускоренной диффузии бора

В задаче показаны диффузионные модели для окисления при ускоренной диффузии / Oxidation Enhanced Diffusion (OED) бора. Если диффузия проводится в кислородной среде, в кремний попадают точечные дефекты в той же степени, в которой окисляется кремний. Появление этих дефектов ускоряет процесс классической диффузии до OED.

В случае OED модель двумерной (**TWO.DIM**) диффузии (используется в случае имплантации в дозах менее $1 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$) должна настраиваться в формулировке **METHOD**. При определении модели концентрация вакансий и атомов в междоузлиях рассчитывается одновременно с количеством внедряемой примеси. Необходимо помнить, что эта модель слабо связана с точечными дефектами, которые возникают при окислении границы Si-SiO₂ при диффузии бора.

При моделировании точечных дефектов необходимо расширять поверхность моделируемого прибора для адекватного расчета точечных дефектов. Моделирование показывает, что в большинстве случаев примесь будет загоняться на глубину от 20 до 50 мкм.

В примере показано также моделирование Ферми, результаты которого отличаются от моделирования по двумерной модели. Приведенные на графике зависимости полной концентрации диффундирующей примеси, рассчитанные с использованием двух разных моделей, демонстрируют влияние окисления при диффузии на глубину загонки.

go athena

Окисление при ускоренной диффузии бора

#задание геометрических размеров структуры и параметров сетки по оси X

line x loc = 0.0 spacing=0.1

line x loc = 0.1 spacing=0.1

задание геометрических размеров структуры и параметров сетки по оси Y

line y loc = 0 spacing = 0.02

line y loc = 2.0 spacing = 0.20

line y loc = 25.0 spacing = 2.5

#определение материала подложки и концентрации примеси в ней

init silicon c.phos=1.0e14

#загонка бора из неограниченного источника примеси

implant boron dose=1e13 energy=70

#задание модели диффузии OED

method two.dim

#разгонка примеси в атмосфере сухого кислорода

diffuse time=30 temperature=1000 dryo2

определение глубины залегания примеси в подложке (на графике строится зависимость полной концентрации примеси Net Doping)

extract name="xj_two.dim" xj silicon mat.occno=1
x.val=0.0 junc.occno=1

сохранение файла структуры

structure outfile=a2_0.str

повторение моделирования процесса диффузии с использованием модели Ферми, которая задана по умолчанию

```

go athena

#классическая двухстадийная диффузия бора

# задание геометрических размеров структуры и параметров сетки по оси X
line x loc = 0.0 spacing=0.1
line x loc = 0.1 spacing=0.1

# задание геометрических размеров структуры и параметров сетки по оси Y
line y loc = 0 spacing = 0.02
line y loc = 2.0 spacing = 0.20
line y loc = 25.0 spacing = 2.5

# определение материала подложки и концентрации примеси в ней
init silicon c.phos=1.0e14

# загонка бора из неограниченного источника примеси
implant boron dose=1e13 energy=70

#задание модели диффузии Ферми
method fermi

#разгонка примеси из ограниченного источника в атмосфере сухого кислорода
diffuse time=30 temperature=1000 dryo2

# определение глубины залегания примеси в подложке (на графике строится зависимость полной концентрации примеси Net Doping)
extract name="xj_fermi" xj silicon mat.occno=1 x.val=0.0
junc.occno=1

#сохранение структуры в файл

```

```
structure outfile=a2_1.str
```

```
# построение графика, на котором сравниваются модели  
диффузии
```

```
tonyplot -overlay a2_0.str a2_1.str -set a2.set
```

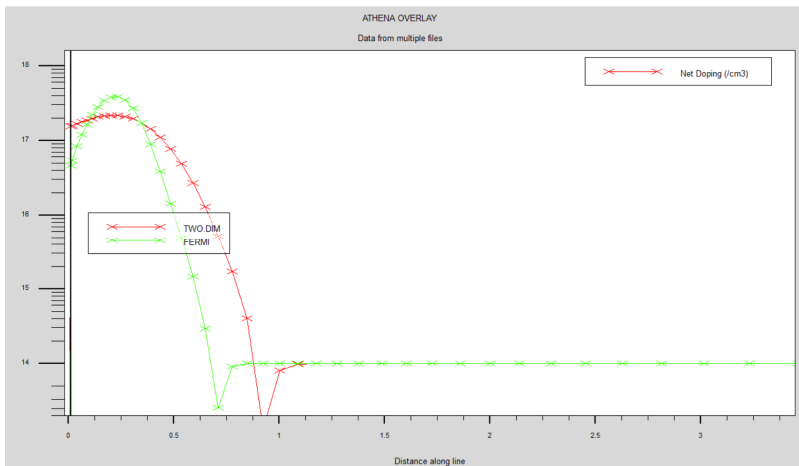


Рис.17

Задание: настройте график таким образом, чтобы на нем отражались материалы (кремний и SiO_2), измените график таким образом, чтобы на нем отражались концентрации фосфора в исходной подложке и внедренного бора (по обоим методам), определите распределение электрического потенциала в объеме полупроводника.

4. Ускоренная на дефектах диффузия мышьяка

В коде демонстрируется влияние ускорения диффузии на дефектах при имплантации большого количества мышьяка, которая используется при изготовлении истока/стока в МОП структуре или эмиттера в биполярной структуре.

Ускорение процесса диффузии за счет дефектов, возникающих при имплантации больших доз примеси, может быть объяснено эффектом нестационарной ускоренной диффузии /

Transient Enhanced Diffusion (TED) (короткий промежуток времени и высокая температура) или быстрого термического отжига / **Rapid Thermal Annealing (RTA)**.

Одним из ключевых параметров моделирования TED является использование модели **full.cpl**, которая позволяет подсчитать степень разрушения структуры при имплантации. Контроль процесса осуществляется с помощью модели **UNIT.DAMAGE** (профиль распределения дефекта при имплантации обсчитывается как один из профилей загонки примеси; на заданной глубине концентрация внедренной примеси, рассчитанная по модели **UNIT.DAMAGE**, будет равна концентрации имплантированных ионов по модели **DAM.FACTOR**, стр. 329, 332 в инструкции к редактору Athena). Параметр **DAM.FACT** определяет концентрацию внедренных ионов по профилю легирования.

Расчет профиля загонки примеси проводится при нагреве до 1000°C в течение 15 с

При моделировании точечных дефектов необходимо увеличивать размеры подложки для моделирования корректных величин точечных дефектов. На графике показано, что в большинстве случаев глубина залегания примеси будет расположена в пределах от 20 до 50 мкм.

В примере показано также моделирование Ферми, результаты которого отличаются от моделирования по двумерной модели. Приведенные на графике зависимости полной концентрации диффундирующей примеси, рассчитанные с использованием двух разных моделей, демонстрируют влияние окисления при диффузии на глубину загонки.

go athena

задание геометрических размеров структуры и параметров сетки по оси X

line x loc = 0.0 spacing=0.1

line x loc = 0.1 spacing=0.1

задание геометрических размеров структуры и параметров сетки по оси Y

line y loc = 0 spacing = 0.005

line y loc = 2.0 spacing = 0.20

line y loc = 25.0 spacing = 2.5

определение материала подложки и концентрации примеси в ней

init silicon c.boron=1.0e17

нанесение оксидной маски (divisions – количество делений сетки, если не задано, то TCAD оптимизирует значения по умолчанию)

deposit oxide thickness=0.005 div=2

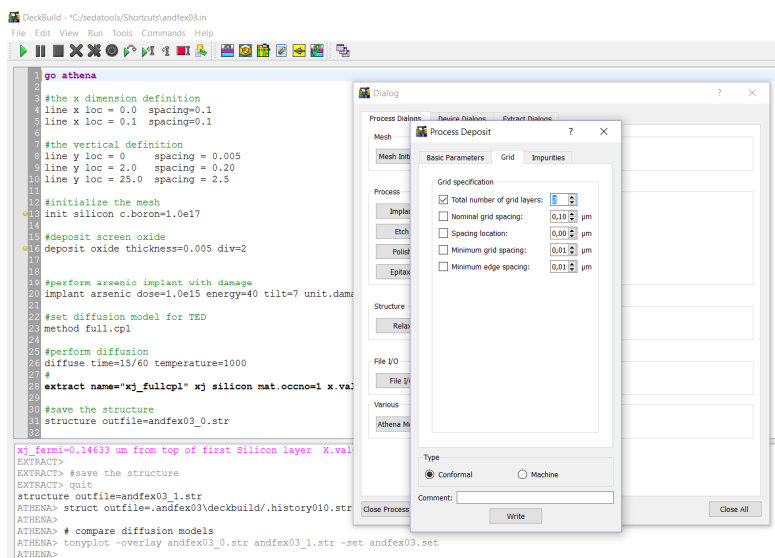


Рис.18

#имплантация мышьяка с указанием наклона пластин и количества дефектов, образующихся при имплантации; **dam.factor** показывает, что концентрация дефектов будет в 10 раз меньше, чем примеси

implant arsenic dose=1.0e15 energy=40 tilt=7 unit.damage
dam.factor=0.1

Process Implant

Impurity

☐ Boron ☐ Phosphorus ☒ Arsenic ☐ BF2

☐ Antimony ☐ Silicon ☐ Zinc ☐ Selenium

☐ Beryllium ☐ Magnesium ☐ Aluminum ☐ Gallium

☐ Carbon ☐ Indium ☐ Chromium ☐ Germanium

Dose: 1,0 exp 15 ions/cm2 Energy: 40 KeV

Model

☐ Dual Pearson ☒ Monte carlo ☐ Initial random number: 2

☐ Gauss ☐ Number of ion trajectories: 20000

☐ Full lateral ☐ Relative smoothing: 0,25

Tilt: 7 degrees

Rotation: 0 degrees ☐ Continual rotation

Material type

☒ Crystalline ☐ Amorphous

Damage

☒ Point defects ☐ <311> Clusters ☐ Dislocation loops

Scaling factor: 0,10

Min cluster thresh: 1,0 exp 17

Max cluster thresh: 1,5 exp 19

Cluster scaling: 1,40

Min loop conc: 1,0 exp 17

Max loop conc: 1,0 exp 18

Comment:

Write

Рис.19.

задание в качестве модели диффузии TED (нестационарной ускоренной диффузии)

method full.cpl

проведение процесса диффузии (15/60 – 15 секунд)

diffuse time=15/60 temperature=1000

расчет глубины залегания примеси в структуре

extract name="xj_fullcpl" xj silicon mat.occno=1 x.val=0.0

junc.occno=1

```

#сохранение файла структуры
structure outfile=a3_0.str

# повторное моделирование процесса диффузии с использованием модели Ферми

# задание геометрических размеров структуры и параметров сетки по оси X
line x loc = 0.0 spacing=0.1
line x loc = 0.1 spacing=0.1
# задание геометрических размеров структуры и параметров сетки по оси Y
line y loc = 0 spacing = 0.005
line y loc = 2.0 spacing = 0.20
line y loc = 25.0 spacing = 2.5

# определение материала подложки и концентрации примеси в ней
init silicon c.boron=1.0e17

# нанесение оксидной маски
deposit oxide thickness=0.005 div=2

# имплантация мышьяка с учетом возникновения дефектов при имплантации
implant arsenic dose=1.0e15 energy=40 tilt=7 unit.damage
dam.factor=0.1

# задание модели Ферми для расчета процесса диффузии
method fermi

# диффузия
diffuse time=15/60 temperature=1000

# расчет глубины залегания примеси в структуре

```

```
extract name="xj_fermi" xj silicon mat.occno=1 x.val=0.0
junc.occno=1
```

```
#создание файла структуры
structure outfile=a3_1.str
```

```
# построение графиков сравнения моделей диффузии
tonyplot -overlay a3_0.str a3_1.str -set a3.set
```

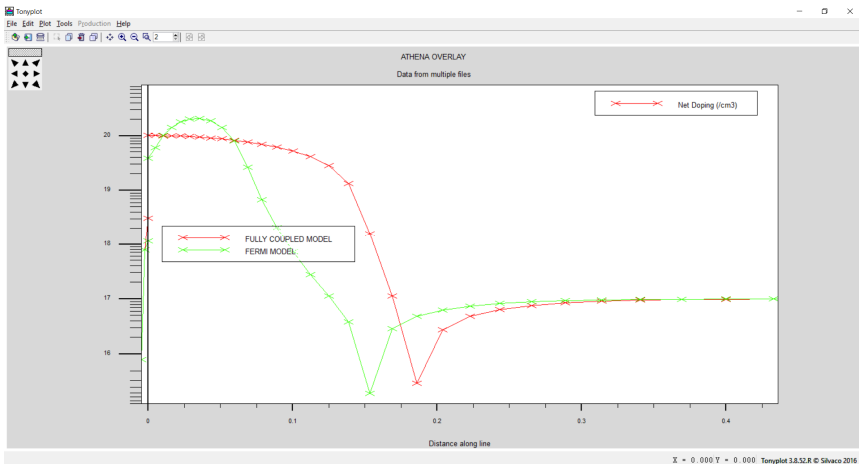


Рис.20

Задание: настройте график таким образом, чтобы на нем отражались материалы (кремний и SiO_2), измените график таким образом, чтобы на нем отражались концентрации мышьяка в исходной подложке и внедренного бора (по обоим методам). Создайте второй p-n переход и определите глубину залегания p-n переходов программным методом.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

Технологические особенности процесса диффузии (часть 2)

1. Накапливание фосфора при окислении

В программе показано накапливание фосфора во время процесса окисления. Для того, чтобы можно было отследить процесс накопления, в подложке изначально задается концентрация фосфора 10^{18} см^{-3} . Эффект накопления становится более выраженным при преобладании процесса окисления над диффузией, так что фосфор, скопившийся у поверхности из-за смещения фронта окисления, не успевает диффундировать в глубину подложки.

Большое давление позволяет повысить степень окисления. При использовании классической модели диффузии Ферми эффект накопления возрастает вследствие роста степени окисления (диффузия не учитывается). Более правильные профили распределения примеси можно получить с использованием двумерной модели (**Two.dim**). При этом диффузия фосфора вглубь структуры проходит быстрее, следовательно, большая область накопления не образуется.

go athena

Накапливание фосфора при окислении

#определение структуры и параметров сетки по оси X

line x loc = 0.0 spacing=0.1

line x loc = 0.1 spacing=0.1

#определение структуры и параметров сетки по оси Y

line y loc = 0 spacing = 0.01

line y loc = 1 spacing = 0.02

задание материала подложки и концентрации примеси
в ней

```
init silicon c.phos=1.0e18
```

```
# проведение диффузии с использованием модели Фер-  
ми и сильным окислением
```

```
# GRID.OXIDE - требуемая толщина слоев структуры,  
которые будут задействованы при окислении
```

```
method fermi grid.ox=0.02
```

```
diffuse time=10 temperature=900 weto2 press=10
```

```
struct outf=a5_1.str
```

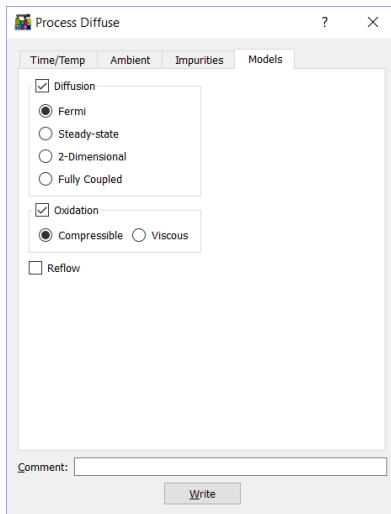


Рис.21

```
# расчет накопления фосфора при окислении с ис-  
пользованием модели TWO.DIM
```

```
# определение структуры и параметров сетки по оси X
```

```
line x loc = 0.0 spacing=0.1
```

```
line x loc = 0.1 spacing=0.1
```

```
# определение структуры и параметров сетки по оси Y
```

```
line y loc = 0 spacing = 0.01
```

```
line y loc = 1 spacing = 0.02
```

```

# задание материала подложки и концентрации примеси
в ней
init silicon c.phos=1.0e18

# проведение диффузии с использованием модели двух-
мерной диффузии и с сильным окислением
method two.dim grid.ox=0.02

# параметры процесса диффузии
diffuse time=10 temperature=900 weto2 press=10
struct outf=a5_2.str

# построение семейства зависимостей распределения
фосфора с использованием двух моделей диффузии
tonyplot -overlay a5_1.str a5_2.str -set a5.set

quit

```

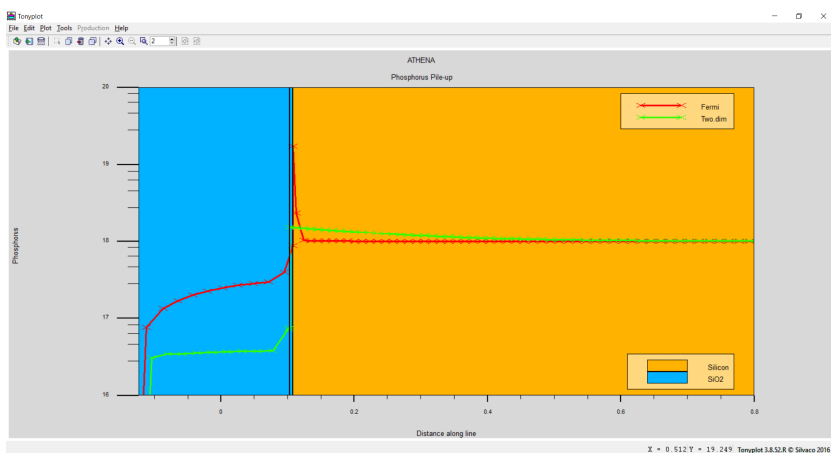


Рис.22

Задание: на основе имеющегося кода проведите двух-стадийную диффузию фосфора в нелегированную подложку (параметры аналогичны используемым в коде). На этапе загон-

ки примеси среда – инертная, на этапе разгонки – проводится одновременное окисление поверхности кремния.

2. Стенфордская модель диффузии связанных пар примесь-дефект

В коде примера показана технология моделирования влияния больших концентраций при диффузии связанных пар примесь – дефект, разработанная в Стенфорде.

Модель была получена Скоттом Краудером и Петером Гриффином. В модели представлен расчет диффузии связанными парами примесь - дефект при возникновении дефектов при больших концентрациях примеси.

Принцип расчета по данной модели основан на использовании команды активации метода **method high.conc.**

Модель расширяет рассмотренную ранее обычную модель диффузии связанных пар примесь – дефект (full.cpl) таким образом, что учитываются эффекты, связанные с образованием пары «легирующая примесь – точечный дефект», возникающие как на поверхности, так и в объеме кристалла.

Параметр **ivfactor** задает примерный уровень рекомбинации на точечных дефектах, который определяется как пара вакансия – ион легирующей примеси, которая рекомбинирует со свободным дефектом внедрения в соответствии с классической рекомбинацией по Френкелю (вакансия - междоузлие). С физической точки зрения параметр может быть определен как величина сечения захвата примеси.

Аналогично **iifactor** определяет уровень рекомбинации на точечных дефектах, связанный с рекомбинацией дефектов по Френкелю и свободных вакансий в соответствии с рекомбинацией вакансия – междоузлие. С физической точки зрения параметр может быть определен как эффективное сечение захвата примеси.

Данная модель может быть использована при концентрациях примеси, не объединенной в кластеры, более 10^{19} см^{-3} .

Стенфордская модель диффузии связанных пар примесь-дефект для диффузии фосфора большой концентрации

определение размеров структуры и параметров сетки по оси X

line x loc = 0.0 spacing=0.25

line x loc = 0.25 spacing=0.25

определение размеров структуры и параметров сетки по оси Y

line y loc = 0 spacing = 0.02

line y loc = 0.50 spacing = 0.02

line y loc = 2.0 spacing = 0.25

line y loc = 25.0 spacing = 2.5

задание материала подложки и концентрации легирующей примеси в ней

init silicon c.phos=1.0e14

задание параметров разрушения структуры при имплантации;

параметры MIN.CLUST и MAX.CLUST определяет величину концентрации имплантируемой примеси; между этими значениями будут создаваться кластеры; по умолчанию минимальное значение берется как уровень легирования подложки, максимальное соответствует полностью аморфизированной подложке; параметр CLUST.FACT определяет соотношение концентрации сгруппированных междоузлий и концентрации имплантируемой примеси

clust max.clust=1e19 clust.fact=1.0 i.phos

имплантация большого количества фосфора, тип получаемого материала - аморфный

implant phos dose=5e15 energy=50 amorp

количество вертикальных линий сетки в создаваемой структуре

deposit oxide thick=0.01 div=1

struct outf=a6_0.str

диффузия без использования моделей с высокими концентрациями

i.loop – граница дислокационных петель задается при имплантации и ведет себя как промежуточная область при диффузии

cluster.dam – указывает, что активна Стенфордская модель с образованием кластеров {311} в кристалле

method full.cpl cluster.dam i.loop phos

ловушки в кремнии / общее количество, см^{-3} , ловушки присутствуют или нет

trap silicon total=0 enable=f

diffuse time=30 temp=850

сохранение структуры в файл

structure outfile=a6_1.str

диффузия с учетом модели с высокими концентрациями примеси

перезагрузка созданного файла в редакторе Athena в любой момент времени в данной сессии DeckBuild данного проекта

init inf=a6_0.str

method full.cpl cluster.dam i.loop high.conc

trap silicon total=0 enable=f

параметры модели с большими концентрациями примеси

interstitial iifactor=0.3 ivfactor=0.3

neu.0 – предэкспоненциальный множитель для нейтральной примеси

```
# neu.E – энергия активации нейтральной примеси
# interstitial – дефект внедрения
interstitial silicon neu.0=1.0e-10 neu.E=1.0
diffuse time=30 temp=850
```

```
# сохранение структуры в файл
structure outfile=a6_2.str
tonyplot -overlay a6_1.str a6_2.str -set a6.set
quit
```

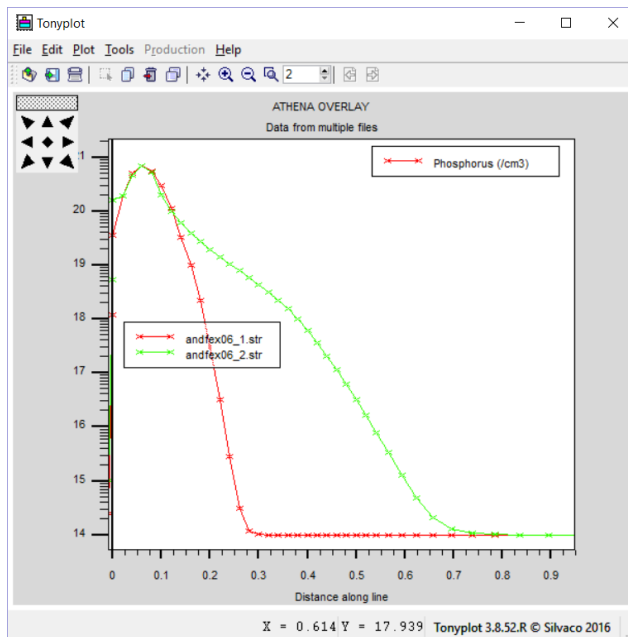


Рис.23

Задание: добавьте примесь бора для создания второго p-n перехода и промоделируйте все процессы еще раз; на соседних графиках выведите оба метода расчета для обеих примесей.

3. Модель диффузии по границам зерен для поликремния

Код задачи демонстрирует диффузию примеси в поликремний в случае диффузии по зернам и межзеренным границам. Для сравнения приведена классическая модель диффузии.

Для активации модели диффузии по зернам используется команда **method poly.diff**.

```
go athena
```

```
#Диффузия мышьяка в поликремний
```

```
# задание геометрических размеров структуры и параметров сетки по оси X
```

```
line x loc = 0.0 spacing=0.1
```

```
line x loc = 0.5 spacing=0.1
```

```
line x loc = 2.5 spacing=0.1
```

```
line x loc = 3.0 spacing=0.1
```

```
# задание геометрических размеров структуры и параметров сетки по оси Y
```

```
line y loc = 0 spacing = 0.02
```

```
line y loc = 0.20 spacing = 0.04
```

```
line y loc = 1.0 spacing = 0.5
```

```
# в качестве подложки используется кремний
```

```
init silicon
```

```
# нанесение нитрида кремния толщиной 0.5 мкм и травливание в нем прямоугольной области заданной формы
```

```
deposit nitride thick=.5 div=10
```

```
etch nitride start x=.5 y=-10
```

```
etch nitride cont x=.5 y=10
```

```
etch nitride cont x=2.5 y=10
```

```
etch nitride done x=2.5 y=-10
```

```
# нанесение поликремния заданной толщины и высоты
```

deposit poly thick=0.2 div=20

равномерная имплантация мышьяка под углом 10°
implant arsenic dose=3e15 energy=20 tilt=10

диффузия имплантированной примеси
diffuse time=10.0 temperature=900

structure outfile=a7_1.str

задание геометрических размеров структуры и параметров сетки по оси X

line x loc = 0.0 spacing=0.1

line x loc = 0.5 spacing=0.1

line x loc = 2.5 spacing=0.1

line x loc = 3.0 spacing=0.1

задание геометрических размеров структуры и параметров сетки по оси Y

line y loc = 0 spacing = 0.02

line y loc = 0.20 spacing = 0.04

line y loc = 1.0 spacing = 0.5

определение материала подложки
init silicon

нанесение нитрида кремния толщиной 0.5 мкм и травливание в нем прямоугольной области заданной формы

deposit nitride thick=.5 div=10

etch nitride start x=.5 y=-10

etch nitride cont x=.5 y=10

etch nitride cont x=2.5 y=10

etch nitride done x=2.5 y=-10

задание метода диффузии в поликремний по границам зерен с указанием размера зерна

method poly.diff

deposit poly thick=0.2 div=20 gr.size=0.01

равномерная имплантация мышьяка
implant arsenic dose=3e15 energy=20 tilt=10

диффузия имплантированной примеси по зернограницной модели

diffuse time=10.0 temperature=900

structure outfile=a7_2.str

tonyplot -st a7_*.str -set a7.set

quit

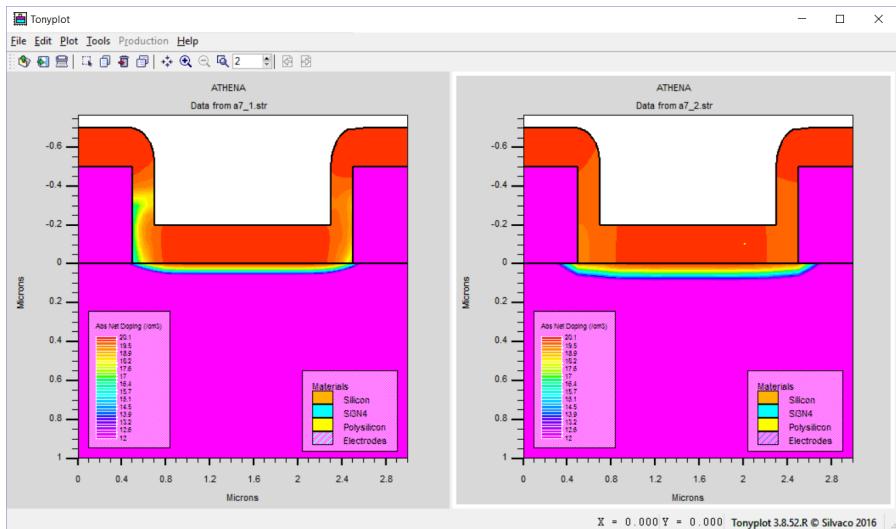


Рис.24

Задание: определите, в каких случаях строится обычный график $Y(X)$, в каких – на график добавляются материалы подложки, примеси, окислов и т.д., в каких – при построении

графика получается изображение готовой структуры? Как настраивается выведение информации на экран?

4. Активация мышьяка

На примере данного кода показана модель активации мышьяка, основанная на объединении примесь мышьяка в кластеры. Используемая по умолчанию модель активации примесей предполагает равномерное распределение.

```
go athena
# модель активации примеси мышьяка

# задание геометрических размеров структуры и параметров сетки по оси X
line x loc=0.00 spac=0.10
line x loc=1.0 spac=0.10
# задание геометрических размеров структуры и параметров сетки по оси Y
line y loc=0.00 spac=0.01
line y loc=2 spac=0.2

# подложка – кремниевая пластина с ориентацией (100)
init silicon orientation=100

# в подложку имплантируется мышьяк в заданном количестве и с заданной энергией
implant arsenic dose=3.0e15 energy=40

# имплантируемая примесь диффундирует вглубь пластины
diffus time=30 temp=800
struct outfile=a8_0.str

# вторая диффузия при более высоких температурах и очень малом времени
diffus time=10/60 temp=1000
```

```
struct outfile=a8_1.str
tonyplot -overlay -st a8_0.str a8_1.str -set a8.set
```

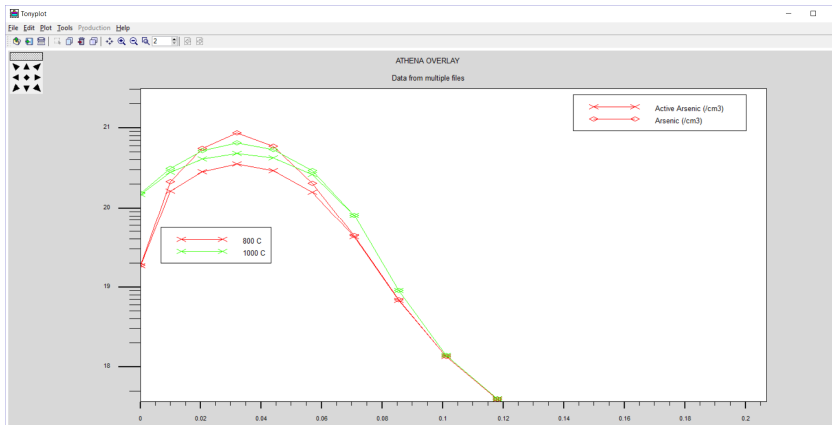


Рис.25

Задание: измените примесь на (а) бор и (б) фосфор; настройте процесс таким образом, чтобы максимальная концентрация примеси располагалась в подложке на глубине 0,4 мкм, а все распределение заканчивалось на глубине 0.6 мкм.

5. Сравнение двумерной модели диффузии и классической модели диффузии Ферми при окислении в сухом кислороде

В данном примере демонстрируется технология использования двумерной модели диффузии (в сравнении с классической моделью Ферми) при условии использования атмосферы сухого кислорода при проведении процесса. Метод **two.dim** демонстрирует явление усиления процесса диффузии при использовании кислородной среды.

```
go athena
```

Эффект усиления процесса диффузии в атмосфере сухого кислорода

```
line x loc = 0.0
line x loc = 0.25 spacing=0.25
line y loc = 0 spacing=0.02
line y loc = 1.50 spacing=0.05
line y loc = 5.0 spacing=1.0
line y loc = 100.0
init silicon c.boron=1.0e14
```

```
# равномерная имплантация бора в пластину кремния
implant boron dose=3e14 energy=70
structure outfile=a1_0.str
```

```
# по умолчанию используется упрощенный метод Фер-
ми (в котором не учитываются дополнительные воздействия на
структуру во время процесса)
method fermi compress
diffuse time=30 temperature=1000 dryo2
structure outfile=a1_1.str
```

```
# перезагрузка файла структуры, созданного ранее
init infile=a1_0.str
```

```
# проведение диффузии по точечным дефектам
method two.dim compress
diffuse time=30 temperature=1000 dryo2
structure outfile=a1_2.str
```

```
tonyplot -overlay -st a1_0.str a1_1.str a1_2.str -set a1.set
```

```
quit
```

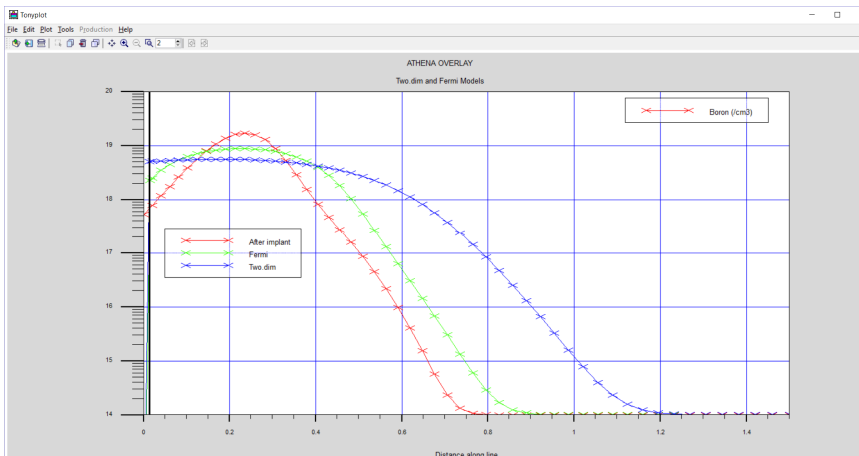


Рис.26

Задание:

1) измените материалы подложки и примеси на (а) фосфор и (б) мышьяк, и настройте технологический процесс таким образом, чтобы глубина диффундирования примеси и ее концентрация были примерно такими же, как и для примеси бора.

2) создайте кристалл кремния размерами 5×2 мкм, параметры сетки по осям X и Y – не менее 0.1; кристалл изначально легирован примесью донорного типа; проведите двухстадийную диффузию акцепторной примеси на глубину 0.6-0.7 мкм (точка первого p-n перехода); проведите двухстадийную диффузию донорной примеси на глубину 0.4-0.5 мкм (точка второго p-n перехода). После каждой технологической операции выводите отдельный график распределения примеси и полной концентрации примеси.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

Основные параметры и технологические особенности процесса ионной имплантации

Ионная имплантация – это введение в полупроводник необходимых примесей в виде ионов. Обладая большой энергией (до 1000 КэВ), ионы примеси проникают через поверхность полупроводника в его кристаллическую решетку. В результате столкновения с атомами, расположенными в узлах кристаллической решетки, ионы примеси смещают их в междоузлия с образованием вакансий или междоузельных атомов. Так как энергия ионов примеси в 100 – 1000 раз больше энергии связи атомов в решетке полупроводника, каждому из них передается огромное количество энергии. Этот лавинообразный процесс вызывает каскад последовательных смещений в кристаллической решетке, разупорядочивание ее и образование десятков тысяч точечных дефектов. Поэтому полупроводниковые подложки для восстановления их кристаллической структуры и снятия напряжений после ионного легирования отжигают при температуре 600 – 800 °С или обрабатывают лазером.

Настройки моделирования процесса ионной имплантации:

implant
[gauss | pearson | full.lat | montecarlo | bca] [crystal | amorphous]
[profile] [measured.sims=<c> | extract.sims=<c>]

Параметры, которые могут быть использованы во всех моделях имплантации:

impurity energy=<n> dose=<n> [full.dose]
[tilt=<n>] [rotation=<n>] [fullrotation]
[plus.one] [dam.factor=<n>] [dam.mod=<c>] [print.mom]

Параметры, которые могут быть применены только в аналитических моделях имплантации:

[x.dscr=<n>] [lat.ratio1] [lat.ratio2] [s.oxide=<n>]
[match.dose | rp.scale | max.scale][scale.mom][any.pearson]
[impl.tab=<c>]

Параметры, которые используются только в моделях имплантации Монте Карло и BCA:

[n.ion=<n>] [mcseed=<n>] [temperature=<n>] [divergence=<n>]
[ionbeamwidth=<n>]
[impact.point=<n>] [smooth=<n>] [sampling] [damage]
[crit.energy=<n>]
[miscut.th][miscut.ph]
[traj.file=<n>] [n.traj=<n>]
[z1=<n>] [m1=<n>] [reflective]

Методы gauss | pearson | full.lat | montecarlo | bca определяют модель имплантации, которая будет использована.

gauss – распределение по Гауссу,

pearson – распределение по модели Пирсона IV, а там, где возможно – двойного Пирсона IV,

full.lat – используется модель Пирсона, в которой поперечная составляющая имплантируемой примеси в двумерном распределении рассчитывается с использованием всех доступных параметров вместо стандартного бокового отклонения ионного пучка,

montecarlo (bca - синоним) – распределение Монте Карло (бинарная кулоновская аппроксимация),

crystal | amorphous – параметр определяет структуру кристаллической решетки кремния; по умолчанию структура – монокристалл; если имплантация проводится через маскирующий слой, для снижения ошибок расчета каналирования ионов рекомендуется использовать аморфную структуру,

profile – параметр позволяет задавать собственный профиль ионной имплантации из проведенных ранее экспериментов,

measured.sims – параметр определяет имя файла, в котором будет располагаться требуемый профиль процесса,
extract.sims – команда на определение имени файла, в котором будет сохранен экстрагируемый профиль,
impurity – примесь, которая будет имплантироваться,
energy – энергия процесса имплантации, КэВ,
dose – доза имплантации, см⁻²,
full.dose – параметр указывает на то, что доза имплантируемой примеси будет подстраиваться под угол наклона пластины для компенсации его влияния,
tilt – угол наклона пластины по отношению к пучку ионов,
rotation – параметр задает угол вращения подложки при имплантации (по умолчанию 30°),
fullrotation – параметр указывает на то, что имплантация будет проводиться при всех величинах угла вращения,
plus.one и dam.factor – параметры, определяющие степень разрушения структуры при имплантации,
dam.mod – параметр задает имя интерпретационного файла на языке C, который будет задействован для изменения технологии моделирования количества дефектов,
print.mom – параметр выводит информацию по всем сочетаниям ион примеси / материал, используемым в аналитических моделях.

(см. стр. 328-331 в Athena_users_1)

1. Сравнение моделей имплантации Гаусса, Пирсона и SVDP (двойного Пирсона с проверкой ограничения профиля распределения примеси)

В коде примера проводится сравнение аналитических моделей имплантации: Гаусса (симметричная имплантация с использованием распределения Гаусса), Пирсона (модель Пирсона IV для аморфной структуры) и двойного Пирсона с проверкой масс-спектрометрией вторичных ионов профиля распределения примеси. Параметр **PRINT.MOM** дает команду на сохранение рассчитанных или определенных из файла структу-

ры изменений кривых при пересчете. Параметр **MOMENTS** определяет выходные данные для расчета.

```
go athena
```

```
# Сравнение моделей имплантации Гаусса, Пирсона и  
SVDP
```

```
line x loc = 0.0 spacing=0.25  
line x loc = 0.25 spacing=0.25  
line y loc = 0 spacing = 0.01  
line y loc = 0.50 spacing = 0.01
```

```
# в качестве исходной подложки выбрана кремниевая  
пластина
```

```
init silicon
```

```
# симметричная имплантация Гаусса (параметры струк-  
туры берутся из встроенный в САПР стандартных таблиц, ко-  
торые подгружаются командой «moments»);
```

```
# в «moments» можно использовать варианты подгрузки  
параметров имплантации из таблиц [svdp_tables | std_tables |  
user_stdtd] [user_table=<c>] (стр. 359 в Athena_Users_1)
```

```
moments std_tables  
implant phos dose=1e14 energy=40 gauss
```

```
struct outf=a1_0.str
```

```
line x loc = 0.0 spacing=0.25  
line x loc = 0.25 spacing=0.25  
line y loc = 0 spacing = 0.01  
line y loc = 0.50 spacing = 0.01
```

```
# в качестве исходной подложки выбрана кремниевая  
пластина
```

```
init silicon
```

```
# использование модели одинарного Пирсона (парамет-  
ры берутся из стандартных таблиц)  
moments std_tables
```

```
implant phos dose=1e14 energy=40 pearson print.mom
```

```
struct outf=a1_1.str
```

```
line x loc = 0.0 spacing=0.25
```

```
line x loc = 0.25 spacing=0.25
```

```
line y loc = 0 spacing = 0.01
```

```
line y loc = 0.50 spacing = 0.01
```

```
# в качестве исходной подложки выбрана кремниевая  
пластина  
init silicon
```

```
# использование метода SVDP (метод подключается по  
умолчанию, параметры берутся из таблиц svdp_tables)  
moments svdp_tables
```

```
implant phos dose=1e14 energy=40 print.mom
```

```
struct outf=a1_2.str
```

```
tonyplot -overlay a1_0.str a1_1.str a1_2.str -set a1.set
```

```
quit
```

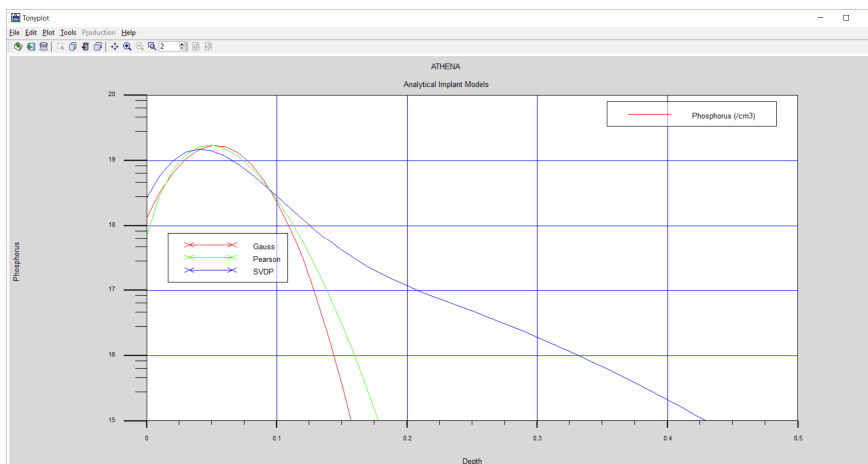


Рис.27

Задание: проведите имплантацию (а) бора, (б) сурьмы с подбором энергии загонки таким образом, чтобы примесь не «прошивала» пластину и имела достаточные для проведения дальнейших технологических операций величины концентрации вблизи поверхности.

2. Зависимость распределения примеси от угла наклона пластины при расчете с использованием SVDP модели

В коде примера показана зависимость профиля имплантации бора при загонке с энергией 35 КэВ от угла наклона пластин в установке ионной имплантации. Для расчета используется метод двойного Пирсона с проверкой ограничения профиля распределения примеси. Из расчета видно, что распределение бора вглубь пластины в значительной степени зависит от ее угла наклона.

```
go athena
# Зависимость распределения примеси от угла наклона
# пластины при расчете с использованием SVDP модели
line x loc = 0.0 spac=0.1
```

```

line x loc = 1.0 spac=0.1
line y loc = 0 spac=0.01
line y loc = 0.7 spac=0.01
init
# имплантация бора с энергией 35 КэВ в дозе  $10^{13}$  см-2
без наклона пластины, без вращения пластины
implant boron energy=35 dose=1.e13 tilt=0 rotation=0
print.mom
struct outfile=a2_00.str

line x loc = 0.0 spac=0.1
line x loc = 1.0 spac=0.1
line y loc = 0 spac=0.01
line y loc = 0.7 spac=0.01
init
# угол вращения пластины равен 1°
implant boron energy=35 dose=1.e13 tilt=1 rotation=0
print.mom
struct outfile=a2_01.str

line x loc = 0.0 spac=0.1
line x loc = 1.0 spac=0.1
line y loc = 0 spac=0.01
line y loc = 0.7 spac=0.01
init
# угол вращения пластины равен 2°
implant boron energy=35 dose=1.e13 tilt=2 rotation=0
print.mom
struct outfile=a2_02.str

line x loc = 0.0 spac=0.1
line x loc = 1.0 spac=0.1
line y loc = 0 spac=0.01
line y loc = 0.7 spac=0.01
init

```

```

# угол вращения пластины равен 7° (используется в
установках на производстве)
implant boron energy=35 dose=1.e13 tilt=7 rotation=0
print.mom
struct outfile=a2_07.str

line x loc = 0.0 spac=0.1
line x loc = 1.0 spac=0.1
line y loc = 0 spac=0.01
line y loc = 0.7 spac=0.01
init
# угол вращения пластины равен 10°
implant boron energy=35 dose=1.e13 tilt=10 rotation=0
print.mom
struct outfile=a2_10.str
tonyplot -overlay a2_00.str a2_01.str a2_02.str a2_07.str
a2_10.str -set a2.set

quit

```

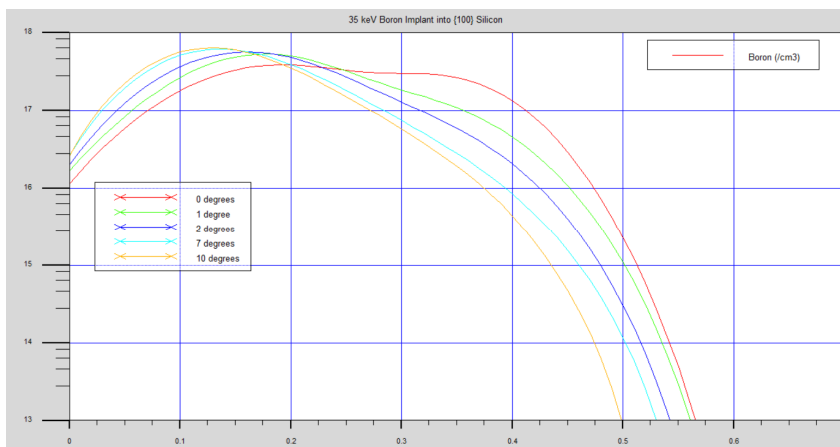


Рис.28

Задание: проведите исследование изменения угла наклона пластины при имплантации на 15 и 30 градусов; в ка-

честве примера расчета использована пластина с ориентацией (100), проведите исследование с использованием пластин с ориентацией (110) и (111).

3. Зависимость от толщины маскирующего оксида при использовании модели SVDP

В коде примера демонстрируется влияние толщины слоя окисла на поверхности полупроводниковой пластины на профиль имплантации примеси бора на 35 КэВ. Окисел выращен при температуре 900 °С в такой среде, что его структура повторяет структуру исходной пластины. Время окисления меняется от 0 до 160 минут, следовательно толщина выращенного оксида будет меняться от 50 до 400 Å. Толщина окисла рассчитывается при моделировании и подставляется в параметр **S.OXIDE** при определении характеристик процесса имплантации. Маскирующий оксид вносит частичную randomness распределения потока ионов, вследствие чего с ростом толщины оксида снижается эффект каналирования. Модель SVDP позволяет в достаточной мере предсказать это снижение.

```
go athena
# Зависимость от толщины маскирующего оксида при
имплантации бора
line x loc = 0.0 spac=0.1
line x loc = 1.0 spac=0.1
line y loc = 0 spac=0.01
line y loc = 0.6 spac=0.01
init
# имплантация в «незащищенный» кремний (толщина
окисла 0.001 мкм)
implant boron energy=35 dose=1.e13 tilt=0 rotation=0
print.mom
# расчет глубины загонки бора в кремний в точке X =
0.0 мкм и сохранение результата в файл
extract name="SIMS" curve(depth, impurity="Boron" mate-
rial="Silicon" mat.oceno=1 x.val=0.0)
```

```

outfile="an03_00.dat"

line x loc = 0.0 spac=0.1
line x loc = 1.0 spac=0.1
line y loc = 0 spac=0.01
line y loc = 0.6 spac=0.01
init
# формирование окисного слоя методом отжига в течение 8 минут при 900 °C в сухом кислороде
diffuse time=8 temp=900 dry
# определение толщины оксида в точке X = 0.0 мкм
extract name="tox8" thickness material="SiO~2"
mat.oceno=1 x.val=0.0
# имплантация бора с энергией 35 КэВ в дозе  $10^{13}$  см-3 без наклона пластины и без вращения; «s.oxide» - параметр, определяющий толщину маскирующего оксида (в мкм)
implant boron energy=35 dose=1.e13 tilt=0 rotation=0
s.oxide=1.0e-04*$tox8 print.mom
# расчет глубины загона бора в кремний в точке X = 0.0 мкм и сохранение результата в файл
extract name="SIMS" curve(depth, impurity="Boron" material="Silicon" mat.oceno=1 x.val=0.0)
outfile="an03_01.dat"

line x loc = 0.0 spac=0.1
line x loc = 1.0 spac=0.1
line y loc = 0 spac=0.01
line y loc = 0.7 spac=0.01
init
diffuse time=20 temp=900 dry
extract name="tox20" thickness material="SiO~2"
mat.oceno=1 x.val=0.0
implant boron energy=35 dose=1.e13 tilt=0 rotation=0
s.oxide=1.0e-04*$tox20 print.mom
extract name="SIMS" curve(depth, impurity="Boron" material="Silicon" mat.oceno=1 x.val=0.0)

```

```

outfile="an03_02.dat"

line x loc = 0.0 spac=0.1
line x loc = 1.0 spac=0.1
line y loc = 0 spac=0.01
line y loc = 0.6 spac=0.01
init
diffuse time=60 temp=900 dry
extract name="tox60" thickness material="SiO~2"
mat.occno=1 x.val=0.0
implant boron energy=35 dose=1.e13 tilt=0 rotation=0
s.oxide=1.0e-04*$tox60 print.mom
extract name="SIMS" curve(depth, impurity="Boron" mate-
rial="Silicon" mat.occno=1 x.val=0.0)
outfile="an03_03.dat"

line x loc = 0.0 spac=0.1
line x loc = 1.0 spac=0.1
line y loc = 0 spac=0.01
line y loc = 0.6 spac=0.01
init
diffuse time=160 temp=900 dry
extract name="tox160" thickness material="SiO~2"
mat.occno=1 x.val=0.0
implant boron energy=35 dose=1.e13 tilt=0 rotation=0
s.oxide=1.0e-04*$tox160 print.mom
extract name="SIMS" curve(depth, impurity="Boron" mate-
rial="Silicon" mat.occno=1 x.val=0.0) outfile="an03_04.dat"

tonyplot -overlay an03_00.dat an03_01.dat an03_02.dat
an03_03.dat an03_04.dat -set an03.set
quit

```

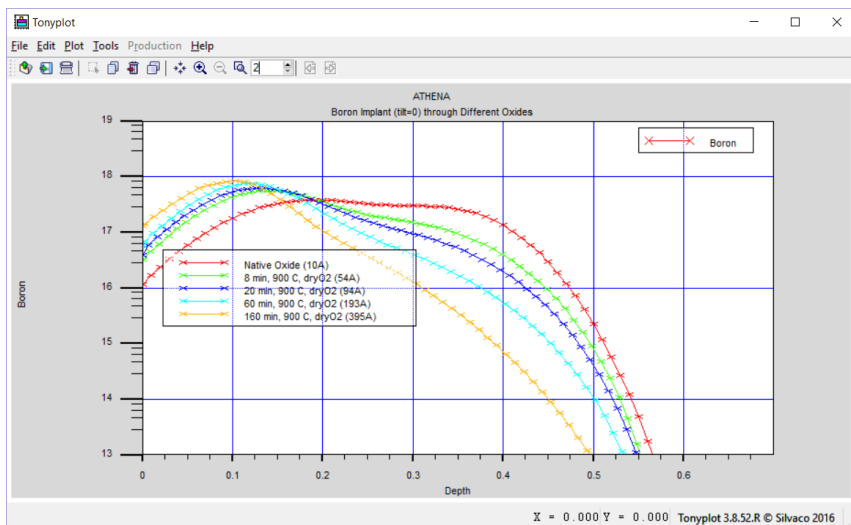


Рис.29

Задание:

1) проведите аналогичные расчеты для времени окисления 5, 10, 15 минут для энергии загонки 20 и 50 КэВ с углом наклона пластин 2 и 7°. Графики группируются по принципу: на 2° при энергии загонки 20 КэВ, на 7° при энергии загонки 20 КэВ, на 2° при энергии загонки 50 КэВ, на 7° при энергии загонки 50 КэВ по 3 графика с временами окисления 5, 10, 15 минут.

2) создайте кристалл кремния размерами 5×2 мкм, параметры сетки по осям X и Y – не менее 0.1; кристалл изначально легирован примесью донорного типа; проведите процесс имплантации (загонка) и диффузии (разгонка) акцепторной примеси на глубину 1.4-1.7 мкм (точка первого р-п перехода); проведите процесс имплантации (загонка) и диффузии (разгонка) донорной примеси на глубину 0.9-1.1 мкм (точка второго р-п перехода). После каждой технологической операции выводите отдельный график распределения примеси и полной концентрации примеси.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

Технология моделирования травления материалов

Редактор Athena позволяет проводить моделирование травления областей структуры двумя методами – классическим травлением области заданной геометрической формы в заданном материале и травлением с помощью «машины травления», которая позволяет строить модель реального механизма многослойной структуры с учетом направленности и изотропности процесса.

Настройки моделирования процесса травления:

Обычное травление областей заданной геометрии:

```
etch  
[material] [name.resist]  
[all | dry] [thickness=<n>] [angle=<n>] [undercut=<n>]  
[left | right | above | below] [p1.x=<n>] [p1.y=<n>]  
[p2.x=<n>] [p2.y=<n>]  
[start | continue | done] [x=<n>][y=<n>]  
[infile=<c>] [top.layer] [noexpose] [direct.angle=<n>]
```

Параметры, используемые при травлении в модуле Elite (код используется для задания команды на травление материала):

```
[machine=<c>] [time=<n>] [hours | minutes | seconds]
```

Параметры, используемые при травлении по RIE, WET.ETCH и PLASMA моделям:

```
[dt.fact=<n>] [dt.max=<n>] [dx.mult=<n>]
```

Параметры, используемые при травлении по модели MC.PLASMA:

```
[mc.redepo] [mc.smooth = <n>] [mc.dt.fact = <n>]  
[mc.modfname = <c>]
```

material – задается материал, который будет стравливаться; если материал указан, остальные материалы, лежащие в области травления, стравливаться не будут;

name.resist – тип стравливаемого фоторезиста,

all – параметр указывает, что стравливаться будут все указанные материалы,

dry – структура стравленной поверхности будет повторять исходный материал,

thickness – толщина стравливаемого слоя, мкм,

angle – наклон боковой стенки в градусах,

undercut – подтравливание под маску, мкм,

left | right | above | below – направление травления, p1.* - координата,

infile – внешний файл с координатами травления,

top.layer – стравливается только верхний слой заданного материала,

poexpose – полученная в ходе травления поверхность не подвергается последующему окислению или нанесению материала,

direct.angle – угол травления от вертикали (0°).

(см. стр. 315-316 в Athena_users_1)

Инструменты для создания «машины травления»:

rate.etch

machine=<c> material | name.resist=<n>

wet.etch | rie | plasma | mc.plasma

Параметры, используемые для моделей RIE и WET.ETCH:

a.h | a.m | a.s | u.h | u.m | u.s | n.m

[directional=<n>] [isotropic=<n>] [chemical=<n>] [divergence=<n>]

Параметры, используемые в модели плазменного травления:

[pressure=<n>] [tgas=<n>] [tion=<n>] [vpdc = <n>]
 [vpac=<n>]
 [lshdc=<n>] [lshac=<n>] [freq=<n>] [mgas=<n>] [mi-
 on=<n>] [qio=<n>]
 [qcht= <n>]
 [child.langm | collision | linear | constant] [ions.only]
 [nparticles=<n>] [energy.div = <n>] [outf.table = <<n>>]
 [outf.angle = <c>]
 [er.linear | er.inhib | er.coverage | er.thermal]
 [k.i=<n>] [k.f=<n>] [k.d=<n>] [sparam=<n>] [theta=<n>]
 [ionflux.thr=<n>] [max.ionflux=<n>] [max.chemfl=<n>]
 [max.depofl=<n>]

Параметры, используемые для плазменного травления по модели Монте Карло:

[ion.types = <n>] [mc.polympt = <n>] [mc.rflctdif = <n>]
 [mc.etch1 = <n>] [mc.etch2 = <n>] [mc.alb1 = <n>]
 [mc.alb2 = <n>]
 [mc.plm.alb = <n>] [mc.norm.t1 = <n>] [mc.norm.t2= <n>]
 [mc.lat.t1 = <n>] [mc.lat.t2= <n>] [mc.ion.cu1 = <n>]
 [mc.ion.cu2= <n>]
 [mc.parts1 = <n>] [mc.parts1 = <n>] [mc.angle1=<n>]
 [mc.angle2=<n>]

machine – имя машины травления,

material / name.resist – материал или фоторезист, для которого будет использована машина травления,

wet.etch / rie / plasma / mc.plasma – параметр определяет модель, по которой будет проводиться расчет на машине травления,

a.h / a.m / a.s / u.h / u.m / u.s / n.m – скорость травления (Å/час, Å/минуты, Å/секунды, мкм/час, мкм/минуты, мкм/с, нм/минуты),

directional – направленность травления (в долях),

isotropic – направленность потока травления (в долях),

chemical, divergence – степень травления в RIE модели относительно пучка ионов, (дивергенция не равна нулю) при угловом расхождении потока ионов по Гауссу.

В режиме построения графиков 1D машина травления работать не будет.

(см. стр. 380-383 в Athena_users_1)

1. Аналитическое травление канавок с заданными углами наклона стенок и подтравливание материалов

Код примера демонстрирует методику использования инструментов **angle** и **undercut** в аналитическом моделировании травления кремния, окисла и нитрида кремния в технологии сухого травления. Угол наклона стенки канавки определяется от горизонтали и по умолчанию равен 90° (вертикальные стенки). Подтравливание под маску задается в мкм.

```
go athena
```

```
# Аналитическое травление канавок с заданными углами  
стенки и определенной величиной подтравливания под маску
```

```
line x loc=0.00 spac=0.10
```

```
line x loc=0.2 spac=0.005
```

```
line x loc=1 spac=0.10
```

```
line y loc=0.00 spac=0.01
```

```
line y loc=0.2 spac=0.02
```

```
line y loc=2 spac=0.1
```

```
init silicon c.boron=1.0e14 orientation=100
```

```
deposit oxide thick=0.01 div=4
```

```
deposit nitride thick=0.2 div=4
```

```
# стравливание нитрида кремния слева от точки на оси  
X, равной 0.2 мкм
```

стравливание окисла слева от точки на оси X, равной 0.2 мкм

отзеркаливание структуры влево, так что канавка травления будет располагаться посередине структуры

etch nitride left p1.x=0.2

etch oxide left p1.x=0.2

struct mirror left

вытравливание канавки с заданными углами наклона стенок

подтравливание под оксиды равно 0.1 мкм, угол наклона стенок равен 80° от горизонтали

etch silicon thickness=0.7 undercut=0.1 angle=80

structure out=etch1.str

tonyplot etch1.str

quit

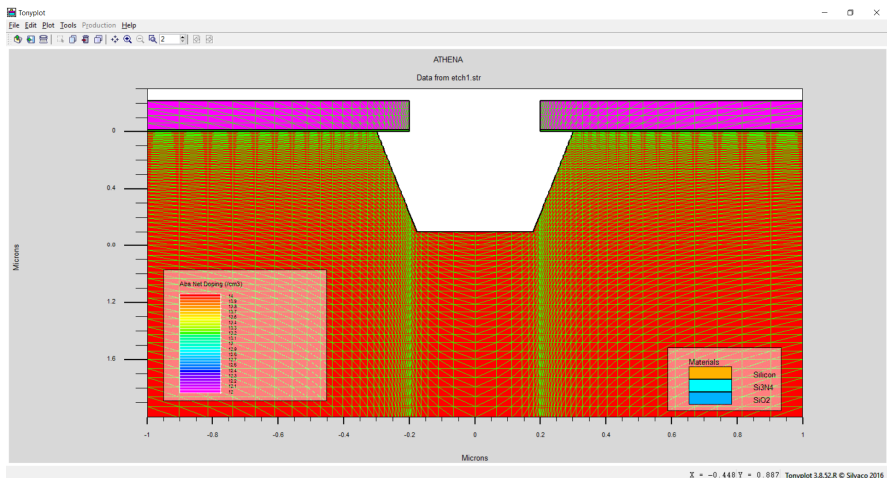


Рис.30

Задание: измените параметры травления таким образом, чтобы

(а) был стравлен только нитрид (весь),

(б) были травлены: нитрид с вертикальными стенками (ширина протравленной области 0.8 мкм), оксид (ширина 0.6 мкм), кремний с вертикальными стенками без подтравливания,

(в) в нитриде и оксиде вытравливалась область той же геометрии, что и в примере, но без отзеркаливания структуры (стр. 316 в Athena_users_1).

2. Травление канавок

В коде примера демонстрируется технология использования инструмента **Elite** для моделирования травления канавок.

При использовании «машины травления» сначала задается конфигурация самой машины травления (через **rate.etch machine=***** и ее параметры), затем машина подключается к указанному в ее конфигурации материалу (через **etch machine=***** с указанием времени травления).

```
go athena

# травление с использованием модели реактивного ион-
ного травления
line x loc=0.00 spac=0.05
line x loc=3.00 spac=0.05
line y loc=0.00 spac=0.05
line y loc=1.00 spac=0.05
# исходная подложка – кремниевая пластина с ориента-
цией (100), сетка задается при определении геометрических
размеров кристалла, множитель сетки не меняет сложность
расчета структуры
init orientation=100 space.mult=1
# нанесение оксида толщиной 0.1 мкм высотой в 5 деле-
ний сетки
deposit oxide thick=0.10 div=5
# травливание прямоугольной области оксида по за-
данным координатам (верхний левый угол, нижний левый угол,
нижний правый угол, верхний правый угол)
etch oxide start x=1.2 y=-10
```

```

etch cont x=1.2 y=10
etch cont x=1.8 y=10
etch done x=1.8 y=-10
# для оптимизации процесса травления используется
шаблон, по которому можно проводить травление в различных
процессах моделирования (стр. 380 в Athena_users_1)
# etch2 – название «машины» травления,
# rie – метод травления, комбинирующий изотропное и
анизотропное травление, кремний – материал, для которого бу-
дут применяться параметры травления,
# n.m – нанометры в минуту (скорость травления),
# chemical – направление травления, нормальное для
ионного пучка,
# directional – компонента анизотропного (направленно-
го) травления,
# divergence – расходимость пучка в RIE модели
rate.etch machine= etch2 rie silicon n.m chemical=125 di-
rectional=100 divergence=90
# изменение конфигурации травления для окисла с ис-
пользованием созданной ранее «машины» травления
rate.etch machine= etch2 rie oxide n.m chemical=5.0 direc-
tional=5
# dx.mult – множитель погрешности для травления с ис-
пользованием инструмента Elite
etch mach= etch2 time=5.0 minutes dx.mult=.5

structure outfile=etch2.str
tonyplot etch2.str
quit

```

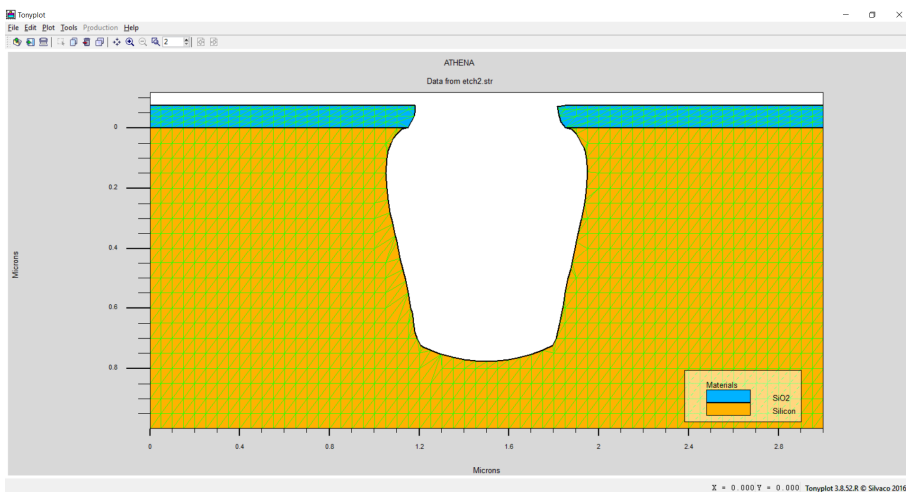


Рис.31

Задание: исследуйте влияние изменения (а) направленности травления, (б) изотропности и (в) направления пучка ионов на травление структуры. Проведите травление сферической области в кремнии, оксид травится с вертикальными стенками. Проведите травление прямоугольной области глубиной 0.9 мкм. Сравите правую часть структуры от точки 1.6 мкм полностью.

3. Упрощенная схема травления с использованием машины травления

Простое направленное травление может быть промоделировано с использованием двух параметров травления: изотропности и направленности. Выбирая положительные или отрицательные величины компоненты `isotropic`, можно построить модель травления канавок с подтравливанием или конических областей.

```
go athena
```

```
#Простое травление канавок  
line x loc=0.00 spac=0.10
```

```
line x loc=3.0 spac=0.10  
line y loc=0.00 spac=0.05  
line y loc=2.0 spac=0.05
```

```
initialize
```

```
# нанесение позитивного фоторезиста SPR500 на крем-  
ниевую подложку, толщина равна 1,16 мкм, 11 делений сетки  
по оси Y
```

```
deposit material=SPR500 thick=1.16 divisions=11
```

```
# стравливание фоторезиста в области между указанны-  
ми координатами
```

```
etch material=SPR500 start x=1.1 y=-10
```

```
etch cont x=1.1 y=10
```

```
etch cont x=1.9 y=10
```

```
etch done x=1.9 y=-10
```

```
# создание первого файла структуры (после формирова-  
ния выемки в фоторезисте)
```

```
structure outfile=etch3_0.str
```

```
# создание машины травления m1 для модели реактив-  
ного ионного травления кремния, изотропность равна 0,  
направление травления равно 1 (в долях), скорость процесса  
определяется в мкм/мин
```

```
# аналогичная машина травления фоторезиста, направ-  
ленное травление
```

```
rate.etch machine=m1 rie silicon iso=0.0 dir=1.0 u.m
```

```
rate.etch machine=m1 rie material=SPR500 iso=0.0  
dir=0.05 u.m
```

```
#запуск машины травления на 1 минуту, dx.mult – мно-  
житель точности (снижается для повышения точности)
```

```
etch machine=m1 time=60.0 second dx.mult=0.5
```

```
# создание второго файла структуры (после травления
фоторезиста и кремния с помощью машины травления)
structure outfile= etch 3_1.str
```

```
# выведение на экран 2 фалов структуры
tonyplot -ttitle etch 3.in -st etch 3_0.str etch 3_1.str
```

```
quit
```

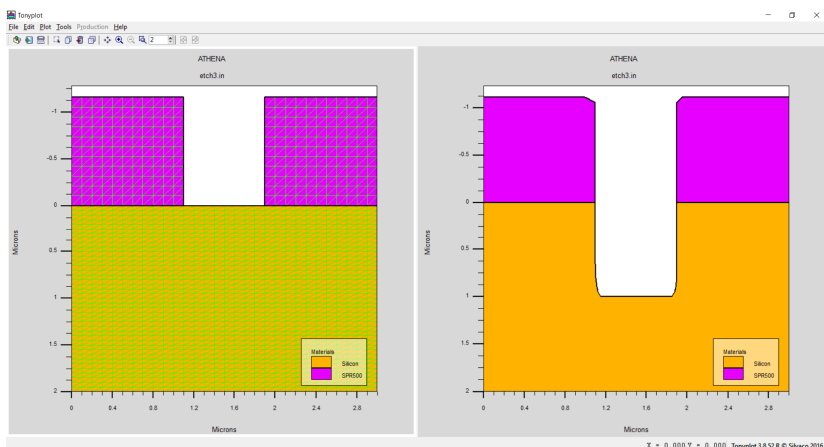


Рис.32

Задание: (а) измените количество делений сетки для фоторезиста на 20, (б) проанализируйте влияние изотропности и направленности травления отдельно на фоторезисте, отдельно на кремнии и на обеих областях одновременно (по 2 примера на каждый случай).

4. Травление канавок с использованием модели RIE (реактивного ионного травления)

В коде примера показано простое травление канавок с использованием комбинации изотропного и направленного компонентов машины травления. Создание разрабатываемой структуры проходит в 3 этапа. Команда **initialize** устанавливает в качестве материала подложки кремний и определяет его гео-

метрические размеры. Далее используется простое нанесение фоторезиста. На третьем этапе моделируется процесс фотолитографии путем вскрытия области фоторезиста длиной 0.8 мкм с наклоном стенок 89° методом обычного травления **ETCH**.

Реактивное ионное травление формируется в 2 этапа: на первом используется сильная изотропность травления (в результате формируется скругленный профиль со значительным подтравливанием фоторезиста), на втором этапе задана сильная направленность травления.

go athena

Травление канавок с использованием модели реактивного ионного травления

line x loc=0.00 spac=0.20

line x loc=0.5 spac=0.05

line x loc=1 spac=0.05

line x loc=1.5 spac=0.05

line x loc=2 spac=0.05

line x loc=2.5 spac=0.05

line x loc=3.0 spac=0.20

line y loc=0.00 spac=0.02

line y loc=2.5 spac=0.1

initialize

deposit material=SPR500 thick=1 div=5

etch material=SPR500 start x=1.1 y=-10

etch cont x=1.1 y=10

etch cont x=1.9 y=10

etch done x=1.9 y=-10

structure outfile=etch4_0.str

rate.etch machine=m1 rie silicon iso=1.0 dir=0.0 u.m

```
etch machine=m1 time=40.0 second dx.mult=0.5  
structure outfile= etch4_1.str
```

```
rate.etch machine=m2 rie silicon iso=0.0 dir=1.0 u.m  
etch machine=m2 time=50.0 second dx.mult=0.5  
structure outfile= etch4_2.str
```

```
tonyplot -st etch4_0.str etch4_1.str etch4_2.str -tttitle etch4.in
```

```
quit
```

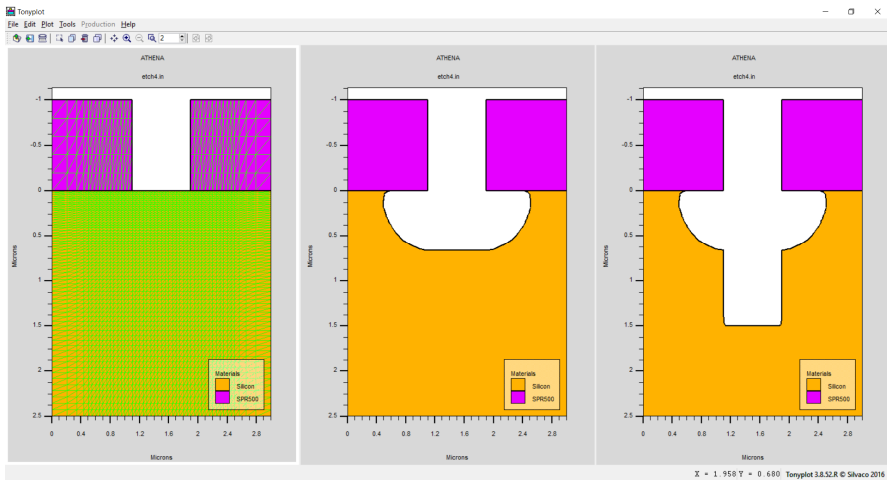


Рис.33

Задание:

1) измените фоторезист на (а) окисел, (б) нитрид кремния, подключите модель изотропного травления в машину травления.

2) создайте кристалл кремния размерами 5×2 мкм, параметры сетки по осям X и Y – не менее 0.1; кристалл изначально легирован примесью донорного типа.

Нанесите пленку окисла толщиной 0.5 мкм; вытравите в ней область шириной 2 мкм. Проведите двухстадийную диффузию акцепторной примеси на глубину 0.6-0.7 мкм (точка

первого р-п перехода) в заданную область; проведите двухстадийную диффузию донорной примеси на глубину 0.4-0.5 мкм (точка второго р-п перехода) в заданную область. После каждой технологической операции выводите график распределения примеси по кристаллу.

3) создайте кристалл кремния размерами 5×2 мкм, параметры сетки по осям X и Y – не менее 0.1; кристалл изначально легирован примесью донорного типа.

Нанесите пленку окисла толщиной 0.5 мкм; вытравите в ней область шириной 2 мкм. Проведите процесс имплантации (загонка) и диффузии (разгонка) акцепторной примеси на глубину 1.4-1.7 мкм (точка первого р-п перехода) в заданную область; проведите процесс имплантации (загонка) и диффузии (разгонка) донорной примеси на глубину 0.9-1.1 мкм (точка второго р-п перехода) в заданную область. После каждой технологической операции выводите график распределения примеси по кристаллу. Сравните результаты формирования переходов методами ионной имплантации и диффузии.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7

Технологические особенности процесса окисления

При механической обработке или предэпитаксиальной подготовке, перед проведением процессов ионной имплантации, диффузии, фотолитографии и др. на поверхности подложек формируют защитное покрытие. В технологии изготовления полупроводниковых приборов и ИС в качестве защитных покрытий используют слои SiO_2 и Si_3N_4 . Они играют роль маски при локальной обработке полупроводниковых пластин, служат для изоляции элементов, в качестве подзатворного или слоя в МДП-структурах, межслойной изоляцией в многослойных коммутационных платах, основанием для размещения пленочных контактных площадок и токоведущих дорожек в ИС, для защиты кристалла.

Диэлектрические свойства нитрида кремния значительно лучше, чем у окисла, поэтому при изготовлении структуры его толщина берется более чем в 2 раза меньше.

Настройки моделирования процесса окисления:

```
oxide
dry02 | wet02 [orient=<n>]
[lin.l.0=<n>] [lin.l.e=<n>] [lin.h.0=<n>] [lin.h.e=<n>]
[l.break=<n>] [l.pdep=<n>]
[par.l.0=<n>] [par.l.e=<n>] [par.h.0=<n>] [par.h.e=<n>]
[p.break=<n>] [p.pdep=<n>]
[ori.dep] [ori.fac=<n>]
[hcl.pc=<n>] [hclt=<n>] [hclp=<n>] [hcl.par=<n>]
[hcl.lin=<n>]
[thinox.0=<n>] [thinox.e=<n>] [thinox.l=<n>] [thinox.p=<n>]
[baf.dep] [baf.ebk=<n>] [baf.pe=<n>] [baf.ppe=<n>]
[baf.ne=<n>] [baf.nne=<n>] [baf.k0=<n>] [baf.ke=<n>]
[stress.dep] [vc=<n>] [vr=<n>] [vd=<n>] [vt=<n>]
[dlim=<n>]
[material] [/material]
```

[diff.0=<n>] [diff.e=<n>] [seg.0=<n>] [seg.e=<n>]
[trn.0=<n>] [trn.e=<n>]
[henry.coeff=<n>] [theta=<n>] [alpha=<n>]
[min.oxidant=<n>]

Параметры управления сеткой:

[initial=<n>] [split.angle=<n>]

Параметры аналитических моделей окисления:

[spread=<n>] [mask.edge=<n>] [nit.thick=<n>] [erf.q=<n>]
[erf.delta=<n>] [erf.lbb=<n>] [erf.h=<n>]

dry02, wet02 – тип окисления (во влажном или сухом кислороде),

orient – ориентация подложки (по умолчанию (100)),

lin.l.0, lin.l.e, lin.h.0, lin.h.e, l.break, l.pdep – параметры определяют линейные коэффициенты по модели Аррениуса,

par.l.0, par.l.e, par.h.0, par.h.e, p.break, p.pdep – параболические коэффициенты,

ori.dep – параметр определяет, будет ли просчитываться ориентация пластины в каждой точке поверхности для расчета линейных коэффициентов,

ori.fac – отношение линейных коэффициентов на области с заданной ориентацией пластины к общей ориентации.

hcl.pc – числовой параметр - % HCl в потоке газа (по умолчанию 0),

stress.dep, vc, vr, vd, vt, dlim – параметры определяют зависимость возникновения напряжений по кристаллу от окисления.

(см. стр. 363-366 в Athena_users_1)

1. Окисление поликремния

В коде примера показана технология окисления поликремния и кремния. Так же в структуре приводится сравнение поликремния с формированием «птичьего клюва». Код начинается с формирования структуры, состоящей из кремние-

вой подложки, на которой сформировано ничем не закрываемое углубление, окисла и поликремния. Перед окислением поликремния с помощью параметров инструмента **oxide** задаются параметры технологического процесса. Далее структура окисляется по модели окисления поликремния.

Параметры диффузии берутся из программного комплекса **SSuprem 4** таким образом, чтобы структура сохранялась в файл через заданные промежутки времени. Параметр **dump.pre** задает имя файла структуры **ox01mxxx.xxx.str**, в котором **xxx.xxx** – время этапа диффузии начиная с первого. Таким образом формируется блок изображений промежуточных этапов процесса.

```
go athena
```

```
# Пример окисления поликремния
```

```
line y loc=0 spac=0.05
```

```
line y loc=0.6 spac=0.2
```

```
line y loc=1
```

```
line x loc=-1 spac=0.2
```

```
line x loc=-0.2 spac=0.05
```

```
line x loc=0.2 spac=0.05
```

```
line x loc=1 spac=0.2
```

```
init orient=100
```

```
# Анизотропное травление области кремния внутри заданных координат
```

```
etch silicon left p1.x=-0.218 p1.y=0.3 p2.x=0 p2.y=0
```

```
# формирование оксидной площадки и поликремниевого затвора
```

```
deposit oxide thick=0.02 div=1
```

```
deposit poly thick=0.5 div=5
```

```
etch poly left p1.x=-0.1 p1.y=0.51 p2.x=0.1 p2.y=-0.55
```

```
etch oxide left p1.x=0
```

изменение параметров окисления поликремния по сравнению с кремнием

коэффициенты, используемые при травлении кремния

#oxide poly wet par.l.0=283.333 par.l.e=1.17

#oxide poly wet par.h.0=7.00 par.h.e=0.78 p.break=950.

#oxide poly wet lin.l.0=3.45e4 lin.l.e=1.60

#oxide poly wet lin.h.0=2.95e6 lin.h.e=2.05 l.break=900.

коэффициенты после адаптации для поликремния

oxide poly wet par.l.0=600 par.l.e=1.17

oxide poly wet par.h.0=14. par.h.e=0.78 p.break=950.

oxide poly wet lin.l.0=7e4 lin.l.e=1.60

oxide poly wet lin.h.0=6e6 lin.h.e=2.05 l.break=900.

окисление области

промежуточные результаты моделирования сохраняются через каждый шаг времени

diffuse time=30 temp=1000 wet dump=1
dump.prefix=ox01m

tonyplot -st ox01m*.str

структура сохраняется в файл

structure outfile=ox01.str

quit

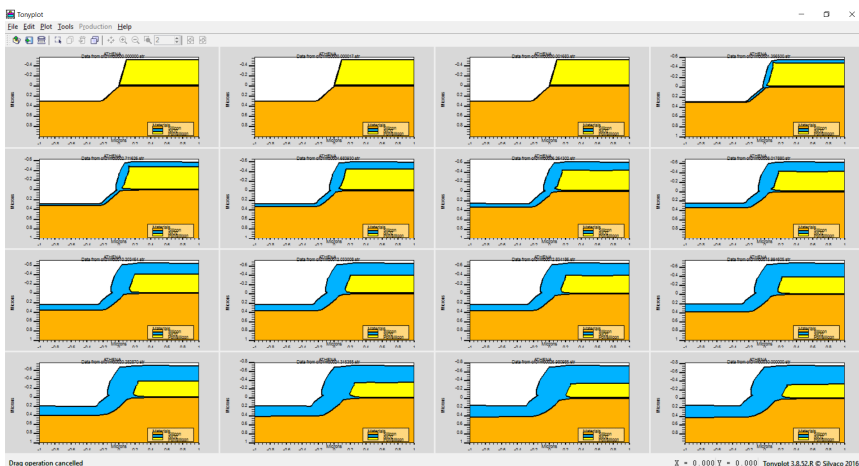


Рис.34

Задание: измените технологию окисления поликремния на сухой кислород; определите, за что отвечают коэффициенты, используемые при окислении поликремния и исследуйте их влияние на процесс окисления; «отзеркальте» структуру, чтобы получился «остров».

2. Зависимость окисления от параметров среды

В коде примера демонстрируется использование программного модуля SSuprem 4 для моделирования влияния среды процесса на модель вязкоупругого окисления. Модели вязкоупругого окисления и зависимости от внешнего воздействия требуют более длительного времени для расчета, чем используемая по умолчанию модель упрощенного окисления (**compress**), поэтому используются только в случаях, когда окисление проходит при температурах более 965 °С (температура течения с внутренним трением / ламинарного потока) или когда важен профиль выращиваемого оксида. Процессы окисления, рассматриваемые в данной задаче, проводятся при внешнем воздействии и без него. В результате строятся два графика структур, рассчитанные по двум различным моделям окисления.

Для подключения модели влияния ламинарности среды используются параметры:

method viscous (модель вязкого течения)

oxide stress.dep=t (команда активирует зависимость окисления от среды)

go athena

Зависимость окисления от параметров среды

поперечное сечение LOCOS технологии (МОП ИС с толстым защитным слоем оксида кремния) в зависимости от параметров среды

line x loc=-1 spac=0.2

line x loc=0 spac=0.05

line x loc=1 spac=0.2

line y loc=0

line y loc=1

init orient=100

формирование слоев оксида и нитрида кремния

deposit oxide thick=0.02 div=1

deposit nitride thick=0.15 div=1

etch nitride left p1.x=0

определение некоторых параметров материалов и модели окисления

отключение моделирования параметров среды (=false)

visc.0 – предэкспоненциальный множитель ламинарного потока

oxide stress.dep=f

material nitride visc.0=1.8e15

method viscous

```
# формирование окисного слоя в течение 90 минут при
температуре 1000 °C во влажном кислороде
diffuse time=90 temp=1000 wet
structure outfile=ox2_1.str
```

```
# проведение такого же моделирования процесса окис-
ления с подключением влияния условий среды
line x loc=-1 spac=0.2
line x loc=0 spac=0.05
line x loc=1 spac=0.2
line y loc=0
line y loc=1
init orient=100
```

```
# формирование слоев окисла и нитрида кремния
deposit oxide thick=0.02 div=1
deposit nitride thick=0.15 div=1
etch nitride left p1.x=0
```

```
# определение некоторых параметров материалов и мо-
дели окисления
# подключение моделирования параметров среды (=true)
oxide stress.dep=t
material nitride visc.0=1.8e15
method viscous
```

```
# формирование окисного слоя в течение 90 минут при
температуре 1000 °C во влажном кислороде
diffuse time=90 temp=1000 wet
structure outfile=ox2_2.str
```

```
tonyplot -st ox2_1.str ox2_2.str -set ox2.set
```

```
quit
```

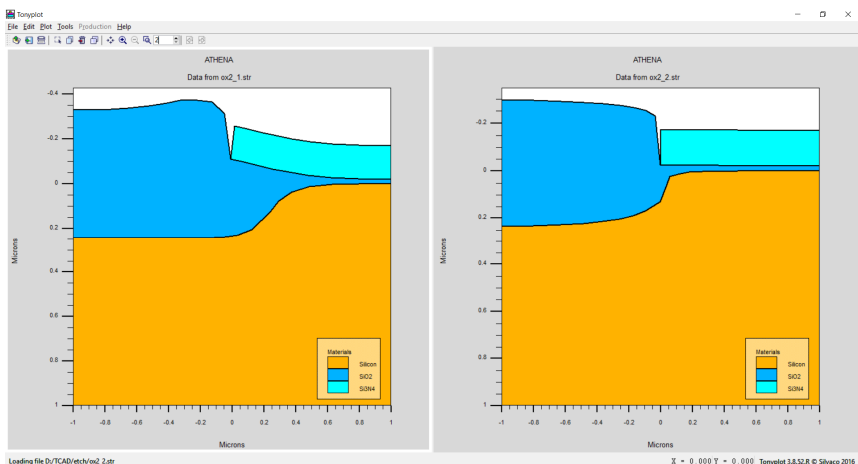


Рис.35

Задание: проведите исследование с влиянием параметров среды на формирование нитрида, изменяя параметры вязкости среды; выведите на экран третий график, на котором будет отображаться структура до окисления нитрида кремния.

3. Формирование «птичьего клюва» для совмещение стыков в локальном окислении канавки (SILO / Sealed Interface Local Oxidation)

В коде примера демонстрируются этапы формирования «птичьего клюва». Маска из нитрида кремния наносится на кремниевую подложку, покрытую окислом, затем в ней вытравливается область заданной конфигурации. Углубление в кремнии изготавливается с использованием нескольких последовательных этапов травления.

Возможности программного комплекса SSuprem 4 сохранять промежуточные состояния процесса позволяют продемонстрировать постепенное формирование «птичьего клюва». Настройка частоты «снимков» процесса проводится при задании параметров диффузии командами **dump** и **dump.prefix**.

go athena

этапы роста окисного профиля

```
line y loc=0 spac=0.05
line y loc=0.6 spac=0.2
line y loc=1
line x loc=-1 spac=0.2
line x loc=-0.2 spac=0.05
line x loc=0 spac=0.05
line x loc=1 spac=0.2
```

```
init orient=100
```

анизотропное травление кремния

```
etch silicon left p1.x=-0.218 p1.y=0.3 p2.x=0 p2.y=0
```

формирование слоев оксида и нитрида и стравливание области в них

```
deposit oxide thick=0.02 div=1
deposit nitride thick=0.1 div=1
etch nitride left p1.x=0
etch oxide left p1.x=0
```

защитное окисление структуры с сохранением промежуточных этапов через каждую минуту

```
diffuse time=90 temp=1000 weto2 dump=1 dump.prefix=ox3m
```

```
tonyplot -st ox3m*.str
structure outfile= ox3_0.str
quit
```

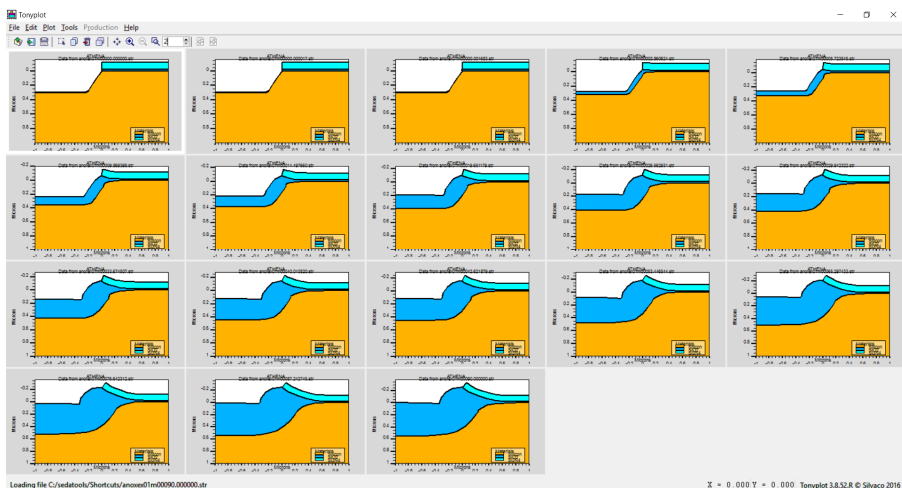


Рис.36

Задание: проведите процесс окисления в сухом кислороде, в инертной среде и в смеси газов (H_2 0.8 л/мин, H_2O 1 л/мин, O_2 0.5 л/мин); добавьте в атмосферу в качестве окислителя HCl .

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8

Послойное нанесение материалов

Процесс нанесения тонких пленок материалов на поверхность структуры может быть смоделирован с помощью инструмента DEPOSIT, в настройках которого задаются материал и его толщина. Нанесение пленки проводится по простейшему алгоритму, описывающему конформное нанесение. По этому алгоритму вся область делится на заданное количество подобластей с толщиной, равной делению сетки. Каждый подслой наносится отдельно от остальных.

Настройки моделирования процесса нанесения материалов:

```
deposit  
material [name.resist=<c>] thickness=<n>  
[si_to_poly] [temperature=<n>]
```

Параметры настройки сетки моделирования:

```
[divisions=<n>] [dy=<n>] [ydy=<n>] [min.dy=<n>  
[min.space=<n>]
```

Параметры, используемые для нанесения легированных слоев:

```
[c.impurities=<n>] [f.impurities=<n.>] [c.interst=<n>]  
[f.interst=<n>]  
[c.vacancy=<n>] [f.vacancy=<n>] [x.comp=<n>]  
[fx.comp=<n>]  
[c.fraction=<n>] [f.fraction=<n>] [y.comp=<n>]  
[fy.comp=<n>] [gr.size=<n>] [f.gr.size=<n>]
```

Настройка машины нанесения слоев (принцип работы – по аналогии с машиной травления):

```
[machine=<c>] [time=<n>] [hours | minutes | seconds]  
[n.particle=<n>] [outfile=<c>] [substeps=<n>] [void]
```

material, name.resist – параметр задает материал или название фоторезиста, который будет наноситься на поверхность рабочей области,

thickness – толщина нанесенного слоя в мкм,

si_to_poly – параметр указывает на то, что на кристаллическая пленка кремния будет расти только на кристалле кремния, на всех остальных областях будет расти поликремний,

temperature – температура, при которой происходит нанесение пленок (параметр используется в модели **stress.hist**, учитывающей внешние воздействия на структуру в процессе нанесения пленки,

divisions – количество вертикальных линий сетки в нанесенной пленке,

dy – номинальное разбиение области, мкм,

udy – глубина, на которой будет применено номинальное разбиение области (отсчитывается от верха последнего нанесенного слоя), мкм,

min.dy – минимальный размер деления сетки в новом слое (по умолчанию 0.001 мкм),

min.space – минимальное расстояние между точками на поверхности каждого промежуточного слоя, мкм,

c.impurities – концентрация примеси в наносимом слое, см^{-3} ,

f.impurities – линейное распределение концентрации выбранной примеси в наносимой пленке, см^{-3} .

(см. стр. 302-304 в Athena_users_1)

1. Селективное и неселективное нанесение кремния

Известно, что на подложке из поликремния или какого-либо другого материала вырастить кристаллический кремний нельзя. В этом случае при моделировании эпитаксиального роста или простого нанесения кремния на поверхность структуры необходимо учитывать, что кристаллический кремний будет расти только на монокристаллической подложке, тогда как на всех остальных материалах вырастет пленка поликремния. Для того чтобы структура наносимого кремния определялась авто-

матически, используется параметр **si_to_poly**, одинаковый для методов **deposit** и **epitaxy**. В коде примера используется нанесение кремния на структуру, состоящую из 2 изолированных областей LOCOS (технология МОП ИС с толстым защитным слоем оксида кремния) и на открытую поверхность монокристаллического кремния.

```
go athena

# Селективное и неселективное нанесение кремния
line y loc=0 spac=0.05
line y loc=0.6 spac=0.2
line y loc=1
line x loc=-1 spac=0.2
line x loc=-0.2 spac=0.05
line x loc=0 spac=0.05
line x loc=1 spac=0.2

init orient=100

# вытравливание области кремния в заданных координатах
etch silicon left p1.x=-0.218 p1.y=0.3 p2.x=0 p2.y=0

# нанесение и протравливание слоев оксида и нитрида кремния
deposit oxide thick=0.02 div=1
deposit nitride thick=0.1 div=1
etch nitride left p1.x=0
etch oxide left p1.x=0

# защитное окисление
# окисел формируется в течение 90 минут при температуре 1000 °С во влажном кислороде
# далее стравливается весь нитрид кремния и окисел толщиной 0.03 мкм
```

построенная структура отзеркаливается для получения канавки

```
diffuse time=90 temp=1000 weto2
etch nitride all
etch oxide thick=0.03
struct mirror right
struct outf=depo1_0.str
```

неселективное нанесение кремния, при котором на всех поверхностях растет монокристаллический кремний

в качестве исходной структуры подключается только что созданный файл

```
init inf= depo1_0.str
```

на поверхность наносится кремний толщиной 0.2 мкм, 10 ячеек сетки по вертикали сформировано для расчета параметров области

```
deposit silicon thick=0.2 div=10
struct outfile= depo1_1.str
```

селективное нанесение кремния с автоматическим формированием поликремниевых областей

для указания на селективность роста кремния используется команда **si_to_poly**

```
init inf= depo1_0.str
```

```
deposit silicon thick=0.2 div=10 si_to_poly
```

```
struct outfile= depo1_2.str
```

```
tonyplot depo1_1.str depo1_2.str -set depo1.set
```

```
quit
```

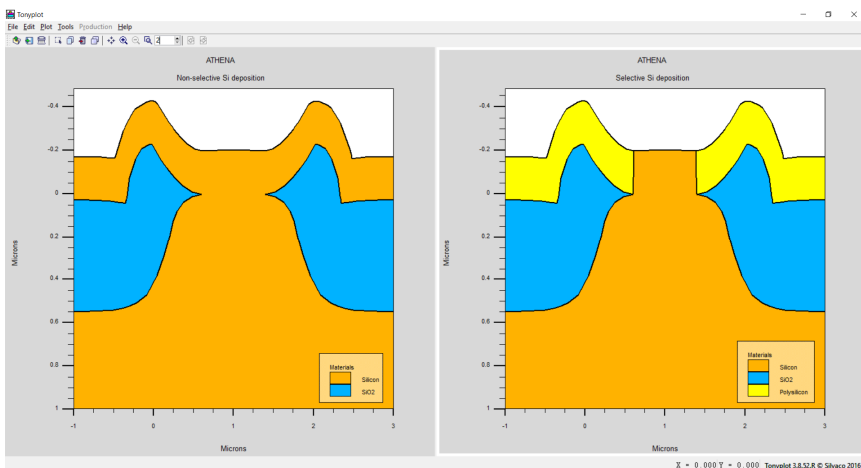


Рис.37

Задание: сформируйте на кремниевой пластине «островки» из поликремния, нитрида кремния, оксида кремния и «канавки» в самой подложке; селективно нанесите на них пленку из кремния.

2. Однонаправленное нанесение пленок на поверхность структуры

В коде примера используется модель однонаправленного нанесения пленок под углами 0, 45, -45 и 80 ° к нормали поверхности. При таком методе нанесения для расчета областей покрытия пленкой используется закон косинусов.

```
go athena
```

```
line x loc=0.00 spac=0.20
```

```
line x loc=1.5 spac=0.05
```

```
line x loc=3.0 spac=0.20
```

```
line y loc=0.00 spac=0.05
```

```
line y loc=1.0 spac=0.5
```

```
initialize
```

```
deposit nitride thick=1 div=20
etch nitride start x=1.0 y=-10
etch cont x=1.0 y=10
etch cont x=2.0 y=10
etch done x=2.0 y=-10
```

```
structure outfile=depo2_0.str
```

для подключения процесса нанесения пленок используется машина нанесения пленок

аналогично машине травления сначала создается процесс нанесения пленки, затем машина подключается на заданное время и формирует заданное количество вертикальных делений сетки

в параметрах машины нанесения пленки указывается угол нанесения

```
rate.depo machine=uni oxide a.m sigma.dep=0.2 uni
dep.rate=1000 angle1=0
deposit machine=uni time=1 minute divis=4
```

```
structure outfile= depo2_1.str
```

```
init infile= depo2_0.str
rate.depo machine=uni oxide a.m sigma.dep=0.2 uni
dep.rate=1000 angle1=45
deposit machine=uni time=1 minute divis=4
structure outfile= depo2_2.str
```

```
init infile= depo2_0.str
rate.depo machine=uni oxide a.m sigma.dep=0.2 uni
dep.rate=1000 angle1=-45
deposit machine=uni time=1 minute divis=4
structure outfile= depo2_3.str
```

```
init infile= depo2_0.str
```

```

rate.depo machine=uni oxide a.m sigma.dep=0.2 uni
depo.rate=1000 angle1=75
deposit machine=uni time=1 minute divis=4
structure outfile= depo2_4.str

```

```

tonyplot -st depo2_0.str depo2_1.str depo2_2.str depo2_3.str
depo2_4.str -tttitle depo2.in
quit

```

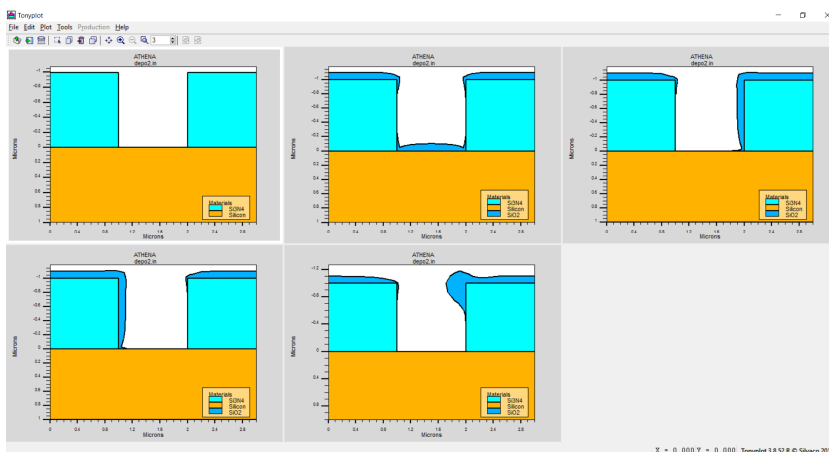


Рис.38

Задание:

1) исследуйте влияние углов $\pm 5^\circ$, $\pm 10^\circ$, $\pm 30^\circ$, $\pm 90^\circ$; определите, какие параметры нанесения пленок используются в приведенной машине нанесения.

2) сформируйте на подложке из стекла размером 10×6 мкм структуру: слой проводящего металлооксида толщиной 0.2 мкм, слой диэлектрического металлооксида толщиной 0.2 мкм, слой полупроводникового металлооксида толщиной 0.03 мкм, слой проводящего металлооксида толщиной 0.2 мкм. Вытравите в верхней пленке посередине окно шириной 4 мкм.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9

Литографические процессы

1. Непланарная оптическая литография

В коде примера используется модуль оптической литографии **Optolith**, который позволяет проводить непланарную литографию поверх сложной структуры, сформированной с использованием программного модуля **SSuprem 4** и блока **Elite**.

Изготовление структуры начинается с выбора кремниевой подложки шириной 24 мкм и высотой 1 мкм. При определении основных параметров подложки задается достаточно крупная сетка моделирования. Параметр **no.imp** говорит о том, что внесение примесей с исходную структуру явно не представлено. В итоге повышается скорость расчета процесса и создается основа для пересчета рельефной структуры с внедренной примесью. Если расчет проводится сразу на рельефной поверхности, исключение примеси при расчете в значительной степени снижает точность результата.

Непосредственное моделирование литографического процесса начинается с нанесения тонкой окисной пленки, которая формирует аналог подзатворного диэлектрика. Далее наносится и частично стравливается нитрид кремния – он определяет вертикальный рельеф, по которому будут проходить границы областей травления. После формирования нитридной маски проводится защитное окисление и удаляется нитрид.

Следующим этапом идет нанесение и формирование поликремниевого затвора травлением заданной формы.

После того, как промежуточная модель прибора была сохранена, проводится имплантация примеси в структуру. В режиме **no.imp** этот этап не проводится. Далее на стенки вытравленных областей наносится и стравливается с использованием вертикальной модели травления слой окисла. Следующим этапом проводится имплантация истока и стока (в режиме **no.imp** этот этап не проводится). После имплантации истока и стока проводится отжиг. Этот этап проходит быстрее в режиме

без внедрения примесей, поскольку при диффузионной разгонке примесей должны проводиться достаточно серьезные расчеты, а в ее отсутствии они не актуальны.

После отжига методом центрифугирования наносится стекло (при нанесении рельеф поверхности сглаживается). Для описания процесса нанесения стекла из модуля **Elite** подключается машина для нанесения материалов, в которой в качестве основных управляющих процессом параметров используются **SMOOTH.WIN** и **SMOOTH.STEP** (определяют размер зерна и степень шероховатости поверхности при нанесении).

В следующем блоке технологических операций наносится фоторезист, в котором травлением формируются области заданной геометрии; активируется машина травления структуры во влажном кислороде; подключается машина направленного травления во влажном кислороде; сохраняется файл структуры и удаляется весь фоторезист.

Далее краткосрочным травлением во влажном кислороде удаляются швы в структуре и наносится алюминий (используется модель полусферической капли из модуля **Elite**).

На следующем этапе наносится фоторезист (используется модель нанесения стекла, созданная ранее). В результате поверхность структуры становится практически планарной. Тип фоторезиста определяется с помощью параметра **name.resist** из библиотеки фоторезистов в файле модели (в качестве фоторезиста взят OiR32).

После нанесения фоторезиста моделирование переходит к модулю **Optolith**. Здесь происходит детальный анализ фотолитографии получившейся структуры. На первом этапе формируется изображение прибора. Параметры **illumination**, **illum.filter**, **projection** и **pupil.filter** задают настройку осветительной системы. Параметр **layout** определяет две используемые маски. Параметр **lay.clear** удаляет все созданные ранее данные о топологии, происходит инициализация новой топологии. Если освещение и топология заданы верно, подключается модуль формирования изображения. Параметр **image** активирует модуль и определяет окно, в котором будет сформировано

изображение. Параметр **dx** задает дискретизацию по оси X, а параметр **one.d** показывает на то, что изображение будет плоским. Параметр **clear** определяет маску как пустое поле с темными областями, заданными в **layout**.

Настройка **optical** задает величину рефракции для материала BPSG на длине волны 0.365 мкм. Параметр **expose** определяет экспонирование фоторезиста по построенному ранее изображению. После экспонирования параметр **bake** обеспечивает отжиг и рассчитывает диффузию светочувствительных компонентов. При проведении моделирования используется модель **mack** с заданным временем процесса **TIME**, количеством шагов, на которых перестраивается сетка и количеством подуровней в каждом шаге, на которых сетка не пересчитывается.

```
go athena
```

```
line x loc=-12.0 spacing=0.3  
line x loc=-5.0 spacing=0.1  
line x loc=-2.5 spacing=0.07  
line x loc=-1.50 spacing=0.05  
line x loc=1.50 spacing=0.05  
line x loc=2.5 spacing=0.07  
line x loc=5.0 spacing=0.1  
line x loc=7.0 spacing=0.1  
line x loc=9.0 spacing=0.1  
line x loc=12.0 spacing=0.3
```

```
line y loc=0.0 spacing=0.01  
line y loc=1.0 spacing=0.3
```

```
init c.boron=1.0e16 space.m=3
```

```
# нанесение и формирование подзатворного диэлектрика  
deposit oxide thick=0.025 div=1  
deposit nitride th=.25 div=1
```

```
etch nitride left p1.x=-5.0  
etch nitride right p1.x=5.0
```

```
method grid.ox=0.2  
diff time=160 temp=965 wet
```

```
etch nitride all
```

```
# нанесение и формирование поликремниевого затвора  
deposit poly thick=0.5 div=10
```

```
etch poly left p1.x=-.5  
etch poly right p1.x=9  
etch poly start x=.5 y=10  
etch cont x=.5 y=-10  
etch cont x=7 y=-10  
etch done x=7 y=10
```

```
structure outfile= lit1_0.str
```

```
# имплантация фосфора для слаболегированной области  
стока
```

```
implant phos dose=3e13 energy=35
```

```
#dep нанесение защитного оксида  
deposit oxide thick=0.4 div=8
```

```
# стравливание излишков окисла  
etch oxide thick=.45
```

```
# имплантация мышьяка в исток и сток  
implant arsenic dose=1e15 energy=50
```

```
# отжиг  
diff time=30 temp=920
```

нанесение диэлектрика с помощью машины (SOG и BPSG – диэлектрические материалы)

rate.depo machine=SOG material=BPSG u.m hemisphe
sigma.dep=2.50 dep.rate=1.0 angle1=90 angle2=-90 smooth.win=5
smooth.step=3

deposit machine=SOG time=1 minutes div=6

structure outfile= lit1_1.str

deposit photoresist thick=.6 div=6

struct outf=photo1.str

etch photoresist start x=-2.5 y=1000

etch cont x=-2.5 y=-1000

etch cont x=-1.5 y=-1000

etch done x=-1.5 y=1000

etch photoresist start x=2.5 y=1000

etch cont x=2.5 y=-1000

etch cont x=1.5 y=-1000

etch done x=1.5 y=1000

rate.etch machine=wet material=BPSG u.m wet.etch isotropic=1

etch machine=wet time=.75 minutes dx.mult=.5

rate.etch machine=m1 rie material=BPSG isotropic=0.0 directional=1.0 u.m

etch machine=m1 time=1.6 minute dt.max=0.01

structure outfile= lit1_2.str

команда на удаление фоторезиста

strip

rate.etch machine=wet2 material=BPSG u.m wet.etch isotropic=1

etch machine=wet2 time=.05 minute

rate.depo machine=ALmetal aluminum u.m sigma.dep=0.35
hemisphe dep.rate=1.0 angle1=70 angle2=-70

deposit machine=ALmetal time=1 minute div=6

rate.depo machine=resistspin photoresist name.res=OiR32
u.m cvd dep.rate=1.0 step.cov=2.5

deposit machine=resistspin time=.4 minute divis=16

rate.depo machine=resistspin photoresist name.res=OiR32
u.m cvd dep.rate=1.0 step.cov=1.0 smooth.win=1 smooth.step=1

deposit machine=resistspin time=.2 minute divis=8

structure outfile= lit1_3.str

блок OPTOLITH

illumination i.line

illum.filter clear.fil circle sigma=0.3

projection na=.3 flare=2

pupil.filter circle

layout x.low=-2.5 z.low=-7.5 x.high=-1.5 z.high=7.5
lay.clear

layout x.low=1.5 z.low=-7.5 x.high=2.5 z.high=7.5

image win.x.lo=-12.0 win.z.lo=-1.0 win.x.hi=12.0
win.z.hi=1.0 dx=0.25 one.d clear

structure outfile= lit1_4.str intensity mask

```
# задание оптических параметров пользовательских ма-  
териалов
```

```
optical material=BPSG wavelength=0.365 refrac.real=1.78  
refrac.imag=0.0
```

```
# экспонирование фоторезиста
```

```
expose dose=220
```

```
structure outfile= lit1_5.str
```

```
# отжиг после экспонирования (сушка)
```

```
bake diff.length=.08
```

```
structure outfile=lit1_6.str
```

```
# формирование маски
```

```
develop mack time=60 steps=5 substeps=24
```

```
structure outfile= lit1_7.str
```

```
tonyplot lit1_7.str -tttitle lit1.in:Final -set lit1.set
```

```
quit
```

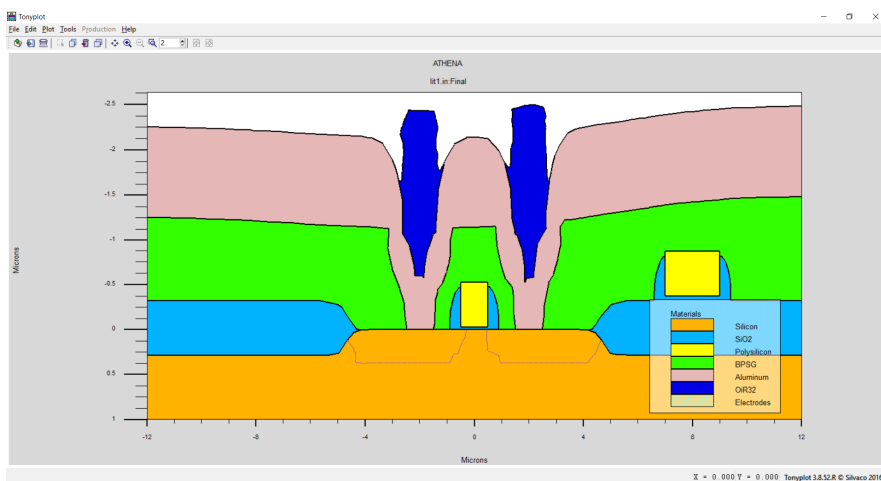


Рис.39

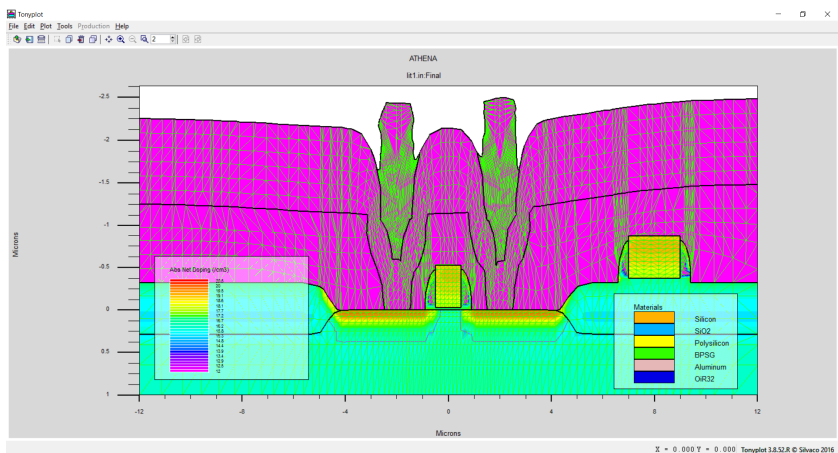


Рис.40

Задание: Проанализируйте компоненты блока OPTOLITH, определите, за что отвечает каждый из них, как они настраиваются.

2. 20 нм n-канальный MOSFET, созданный с использованием 60 нм фотолитографии

В коде примера показан процесс создания самосовмещенного n-канального MOSFET, изготовленного по 60 нм фотолитографии. Основные преимущества этого процесса:

- имплантация области канала не попадает в подзатворный диэлектрик,
- в кремнии при неустановившейся ускоренной диффузии не возникают дополнительные дефекты,
- для процесса имплантации требуются очень малые энергии,
- с использованием 60 нм литографии можно изготовить транзисторы с длиной затвора 20 нм.

Из-за того, что при имплантации области канала структура практически не разрушается, такая технология не оказывает влияния на область затвора. Области истока и стока также создаются таким образом, что кремниевая пластина не повреждается. Возникающие при диффузии эффекты, которые при-

водят к разрушению структуры пластины, в данном процессе исключены: энергия имплантации составляет величину 10 КэВ.

Влияние нитрида кремния на формируемую структуру рассчитывается в редакторе Athena и используется при моделировании характеристик транзистора в качестве дополнительного параметра напряжения структуры, которое отражается в изменении ширины запрещенной зоны и подвижности в приборе.

В редакторе Atlas настройки влияния напряжений структуры на ширину запрещенной зоны задаются параметром **stress**, а подвижность регулируется параметрами **egley.n** и **egley.p** для электронной и дырочной составляющих, соответственно.

В рассчитанный файл структуры при проведении процесса моделирования помещаются также подвижность электронов и их скорость. Из этих параметров можно определить, что большая часть канала выходит на насыщение из-за очень малых размеров транзистора: плотность тока при $V_g=V_d=1.2$ В составляет 2000 мкА/мкм.

```
go athena
```

```
line x loc=0 spac=0.002  
line x loc=0.01 spac=0.001  
line x loc=0.03 spac=0.005  
line x loc=0.07 spac=0.005  
line y loc=0 spac=0.001  
line y loc=0.25 spac=0.02
```

```
init silicon boron resistivity=10 orientation=100
```

```
deposit oxide thick=0.02 divisions=10  
etch oxide start x=0.03 y=-0.02  
etch cont x=0 y=-0.02  
etch cont x=0 y=0  
etch done x=0.03 y=0
```

deposit nitride thick=0.02 divisions=10
struct mirror left

implant boron dose=5e14 energy=10 tilt=7 fullrotation bca
n.ion=200000

etch nitride dry thick=0.02
deposit oxynitride thick=0.0015 divisions=2
deposit polysilicon thick=0.02 divisions=10 c.arsenic=1e16
etch polysilicon dry thick=0.02
etch oxynitride dry thick=0.0015
etch oxide dry thick=0.02

deposit polysilicon thick=0.02 divisions=10 c.arsenic=1e16
deposit oxide thick=0.004 divisions=2

implant arsenic dose=1e16 energy=10 tilt=7 fullrotation bca
n.ion=200000

method full.cpl high.conc grid.silici=0.002
diffus time=0.1 temp=750 t.final=1050 nitro
diffus time=0.12 temp=1050 nitro
etch oxide dry thick=0.01
etch polysilicon dry thick=0.02

deposit cobalt thick=0.02 divisions=10
diffus time=1 temp=550 nitro
etch cobalt all
etch polysilicon dry thick=0.002

electrode name=source x=-0.065
electrode name=source x=-0.04
electrode name=gate x=0
electrode name=drain x=0.04
electrode name=drain x=0.065
electrode name=substrate backside

```
material nitride intrin.sig=2e10
stress temp1=20 temp2=20
struct outfile= lito2_0.str
tonyplot lito2_0.str -set lito2_0.set
```

```
go atlas
```

```
mesh infile= lito2_0.str
```

```
material material=oxynitride permittivity=8
```

```
models consrh cvt fermi bbt.kl STRESS
MOBILITY EGLEY.N EGLEY.P
```

```
method climit=1e-4 itlimit=35 maxtraps=10
output e.mob e.velocity
```

```
solve init
solve previous
solve vdrain=0.01
solve vdrain=0.1
log outfile= lito2_0.log
solve previous
solve vgate=0.01
solve vgate=0.05 vstep=0.05 vfinal=1.2 name=gate
extract name="vt" (xintercept(maxslope(curve(abs(v."gate"),
abs(i."drain"))))) - abs(ave(v."drain")) / 2.0)
log off
```

```
solve init
solve previous
solve vdrain=0.01
solve vdrain=0.1
solve vdrain=1.2
log outfile= lito2_1.log
```

```

solve previous
solve vgate=0.01
solve vgate=0.05 vstep=0.05 vfinal=1.2 name=gate
log off
save outfile= lito2_1.str
tonyplot lito2_0.log -overlay lito2_1.log -set lito2_1.set
tonyplot lito2_1.str -set lito2_2.set

quit

```

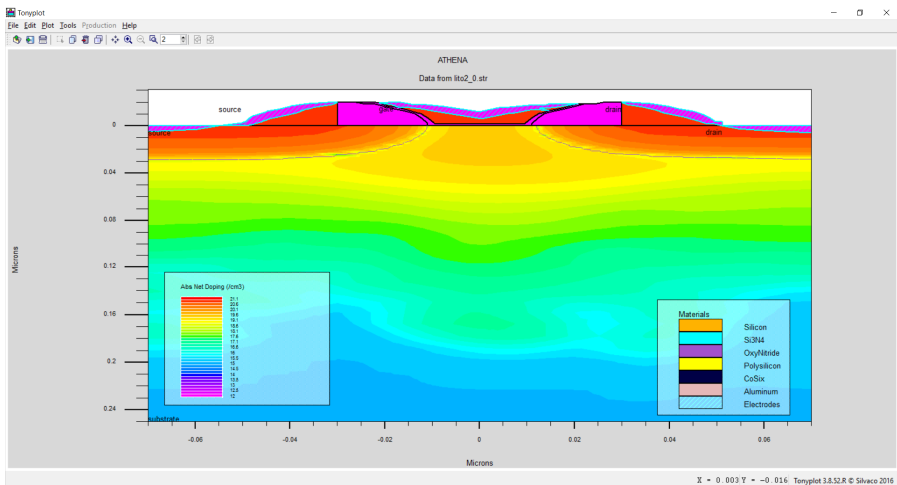


Рис.41

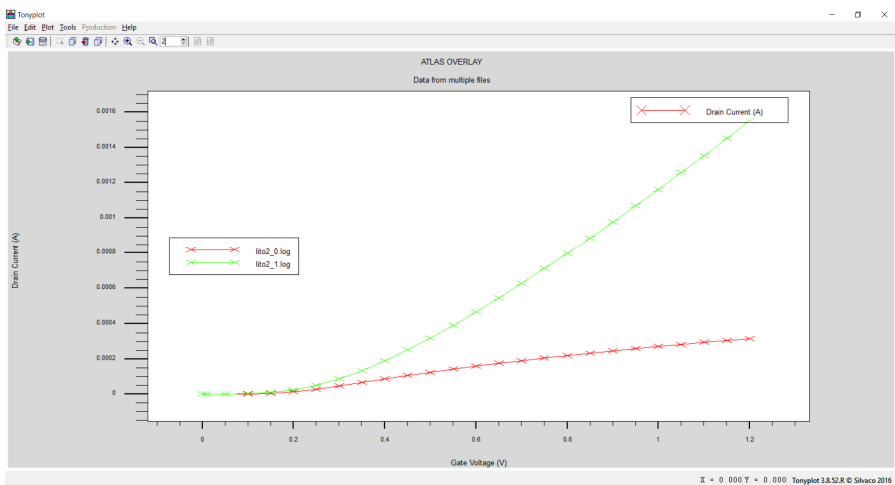


Рис.42

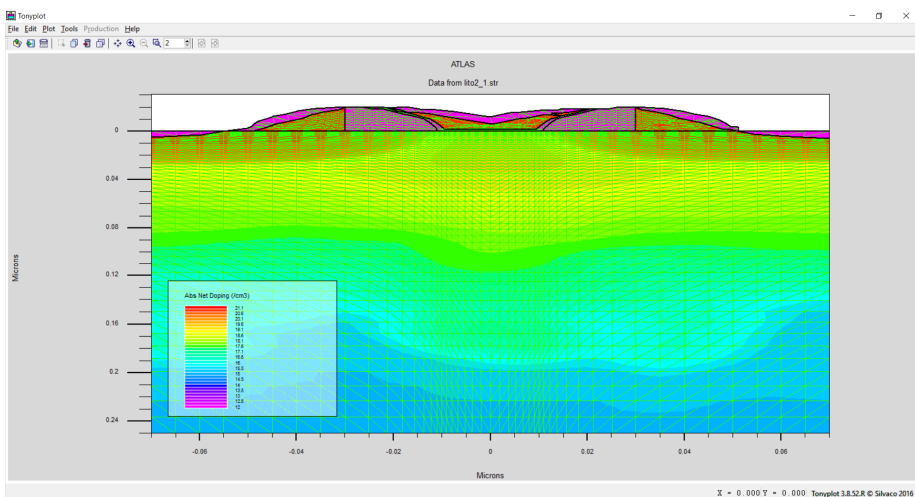


Рис.43

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 10

Выращивание эпитаксиальных пленок

Ориентированное наращивание слоев вещества с воспроизведением кристаллической структуры подложки называют **эпитаксией**. При этом поступающие извне атомы осаждаемого вещества должны обладать достаточной энергией и способностью мигрировать по поверхности подложки, чтобы формирование кристаллической решетки происходило равномерно по всей поверхности без образования дефектов. С повышением температуры подложек миграция атомов увеличивается. При низких температурах растут поликристаллические слои.

В процессе роста эпитаксиальных слоев их легируют введением донорной или акцепторной примеси, что позволяет создавать слои n- и p- типа проводимости.

Настройки моделирования процесса наращивания эпитаксиальных пленок:

epitaxy

time=<n> [hours | minutes | seconds]

temperature=<n> [t.final=<n> | t.rate=<n>]

[thickness=<n> | growth.rate=<n>]

Параметры, определяющие свойства вносимой примеси:

[c.impurities=<n>] [f.impurities=<n.>] [c.interst=<n>]

[f.interst=<n>]

[c.vacancy=<n>] [f.vacancy=<n>]

Параметры, определяющие настройки сетки:

[divisions=<n>] [dy=<n>] [min.dy=<n>] [ydy=<n>]

[si_to_poly]

time – время процесса эпитаксии в минутах (по умолчанию), может быть задано в секундах или часах,

temperature – температура процесса эпитаксии,

t.final – при задании градиента температуры во время процесса эпитаксии, параметр определяет конечное значение температуры, до которой будет происходить ее рост или понижение,

t.rate – скорость изменения температуры °C,

thickness – толщина эпитаксиально выращенной пленки, мкм,

growth.rate – скорость роста пленки при использовании процесса с градиентом температуры, мкм/минуты.

(см. стр. 312-313 в Athena_users_1)

1. Эпитаксиальный рост

В коде примера показано использование инструмента **epitaxy** для формирования эпитаксиальных слоев с заданными параметрами сетки и определенной концентрацией бора.

```
go athena
```

```
# Эпитаксия
```

```
line x loc=0.0 sp=0.1
```

```
line x loc=1.0 sp=0.1
```

```
line y loc=0. sp=0.04
```

```
line y loc=1.0 sp=0.1
```

```
init c.boron=5e12
```

```
# выращивание эпитаксиальной пленки кремния, леги-  
рованной бором в концентрации  $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , толщина наращён-  
ной пленки 8 мкм, время роста 100 минут, температура процес-  
са 927 °C
```

```
epitaxy c.boron=5.e16 thick=8 time=100 temp=927 dy=.5  
ydy=4. div=30
```

```
structure outfile=epit1.str
```

```
tonyplot epit1.str
```

quit

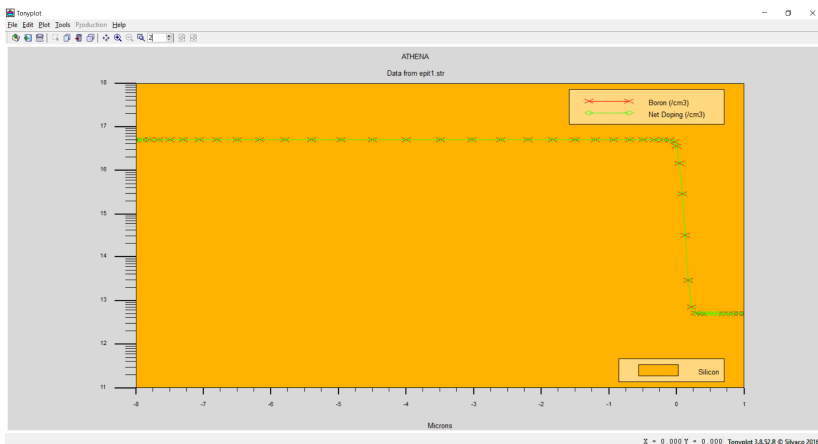


Рис.44

Задание: проведите наращивание эпитаксиальных пленок кремния, легированного фосфором и бором на одну подложку последовательно; постройте распределение концентрации примеси.

2. Селективное и неселективное нанесение кремния

Код программы взят из лабораторной работы № 8.

```
go athena
```

```
line y loc=0 spac=0.05  
line y loc=0.6 spac=0.2  
line y loc=1  
line x loc=-1 spac=0.2  
line x loc=-0.2 spac=0.05  
line x loc=0 spac=0.05  
line x loc=1 spac=0.2
```

```
init orient=100  
etch silicon left p1.x=-0.218 p1.y=0.3 p2.x=0 p2.y=0
```

```

deposit oxide thick=0.02 div=1
deposit nitride thick=0.1 div=1
etch nitride left p1.x=0
etch oxide left p1.x=0

```

```

diffuse tim=90 tem=1000 weto2
etch nitride all
etch oxide thick=0.03
struct mirror right
struct outf=depo1_0.str

```

```

init inf= depo1_0.str
deposit silicon thick=0.2 div=10
struct outfile= depo1_1.str

```

```

init inf= depo1_0.str
deposit silicon thick=0.2 div=10 si_to_poly
struct outfile= depo1_2.str
tonyplot depo1_1.str depo1_2.str -set depo1.set

```

quit

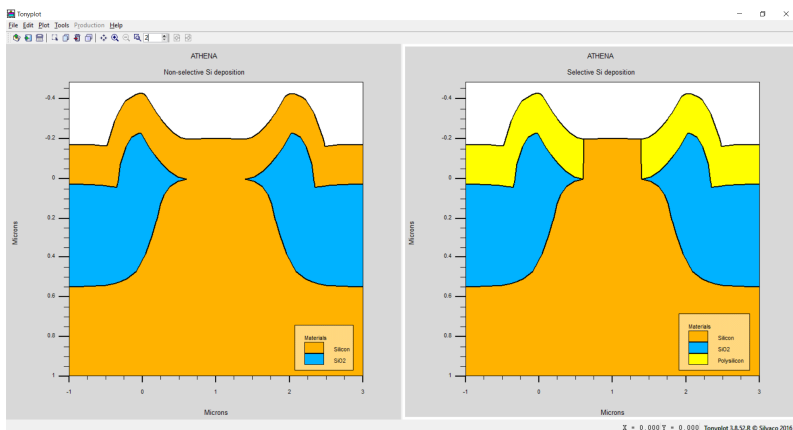


Рис.45

Задание: замените процесс нанесения пленок на эпитаксию, постройте модель структуры.

3. Параметры включения вертикальной DMOS структуры

Код примера демонстрирует технологию изготовления и исследование электрофизических характеристик вертикальной DMOS структуры. Из него можно определить:

- последовательность этапов формирования DMOS транзистора в редакторе Athena,
- настройки параметров моделирования неизотермических процессов с помощью инструмента Giga,
- методику моделирования стокозатворных характеристик транзистора в редакторе Atlas.

В редакторе Athena формируется структура вертикального DMOS транзистора на кремниевой подложке. Подложка легирована фосфором в заданной концентрации. Для подложки заданы настройки сетки моделирования. Слаболегированный фосфором эпитаксиальный слой кремния выращивается с помощью команды **epitaxy**. Материал затвора наносится и формируется с помощью фотолитографии и травления. Следующим этапом идет имплантация бора и его диффузия в правой части канала под затвором. Область истока создается имплантацией мышьяка с последующей диффузией. Таким образом, канал оказывается четко виден. Для контакта истока наносится и стравливается алюминий. Электроды истока, стока и затвора задаются командой **electrode** с использованием их имен и места расположения в структуре. Электрод стока формируется на всей обратной стороне структуры с помощью командного слова **backside**.

После того, как вся структура сформирована, ее электрофизические характеристики анализируются в редакторе Atlas.

При проведении моделирования характеристик код структуры автоматически загружается в редактор Atlas ко-

мандной строкой **go atlas**. Параметром **contact** устанавливается работа выхода для затвора, который сформирован из вырожденного поликремния n-типа. Команда **models** определяет параметры переноса заряда в структуре по существующим моделям:

- **conmob** – зависимость подвижности от концентрации носителей заряда,
- **fldmob** – зависимость подвижности от поперечного электрического поля,
- **srh** – рекомбинационная модель Шоккли-Рида-Холла,
- **lat.temp** – неизотермический перенос с использованием инструмента Giga (особенно важна в случае силовых приборов).

Стокозатворные характеристики построенного таким образом DMOS транзистора рассчитываются с использованием моделирования переноса заряда и температурной зависимости при смещении затвора с помощью настройки параметра **solve**. Напряжение на стоке изменяется до 20 В (лог-файл можно просматривать в стороннем редакторе). Напряжение на затворе изменяется от 0.25 до 20 В в два этапа.

Для первых приближений рекомендуется задавать малые величины смещения. Увеличение шагов расчета можно проводить для последних этапов моделирования.

```
go athena
```

```
line x loc=0.00 spac=0.25
```

```
line x loc=3.00 spac=0.10
```

```
line x loc=10.00 spac=1.0
```

```
line y loc=7.00 spac=0.5
```

```
line y loc=8.00 spac=0.5
```

```
init c.phosphor=1.0e18 orientation=100 space.mult=2
```

```
epitaxy time=10 temp=1200 thickness=7 divisions=15
```

```
dy=0.10 ydy=0.00 c.phos=1.0e15
```

deposit oxide thickness=0.06 div=1
deposit poly thickness=0.35 div=3
deposit oxide thickness=0.35 div=3
deposit photores thickness=1 div=3

etch photores p1.x=3 left
etch oxide p1.x=3 left
etch poly p1.x=3 left
etch oxide p1.x=3 left

implant boron dose=1e14 energy=80

etch photores all

diffuse time=100 temp=1100

implant arsenic dose=3e15 energy=100
diffuse time=20 temp=1100

deposit oxide thickness=0.5 div=4
etch oxide thickness=0.5

etch start x=0 y=-0.1
etch cont x=0 y=0.8
etch cont x=2.5 y=0.8
etch done x=2.5 y=-0.1

diffuse time=1 temp=1100

deposit alum thickness=1 div=8
etch alum right p1.x=3.5

electrode name=source x=0
electrode name=gate x=5 y=-0.2
electrode name=drain backside

```

structure outfile=epi3_0.str

tonyplot epi3_0.str -set epi3_0.set

# команда на подключение редактора для обсчета харак-
теристик построенной структуры транзистора
go atlas
contact name=gate n.poly
# flowlines – указывает на то, что сохранение будет про-
ходить во всех существующих форматах
models conmob fldmob srh lat.temp
output flowlines

# thermcontact – определяет положение и параметры
термического контакта, используется с параметром Giga при
расчете нагрева кристаллической решетки элемента
thermcontact num=1 name=source temp=300

# solve prev – предыдущий расчет будет использован для
начального приближения расчета
solve init
solve prev
solve vstep=0.5 vfinal=5 name=drain
solve vstep=5 vfinal=20 name=drain
log outf= epi3_1.log

solve vstep=0.25 vfinal=2 name=gate
solve vstep=0.5 vfinal=5 name=gate
solve vstep=1 vfinal=20 name=gate
save outf= epi3_2.str

tonyplot epi3_1.log -set epi3_1.set

quit

```

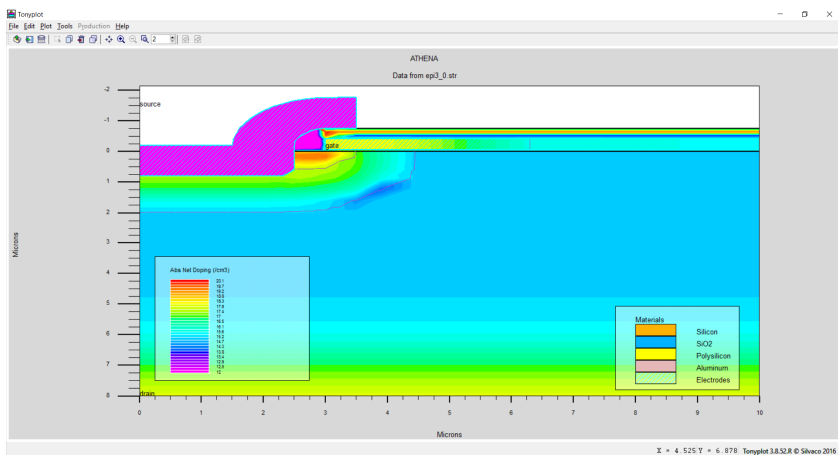


Рис.46

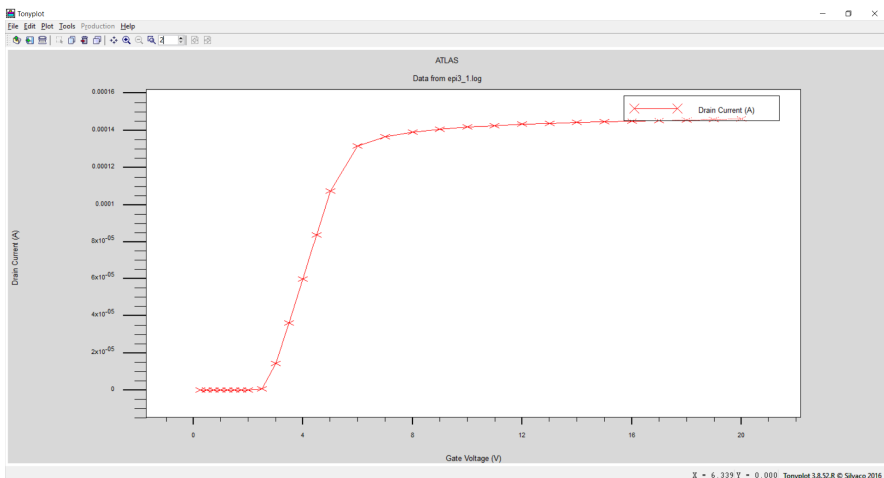


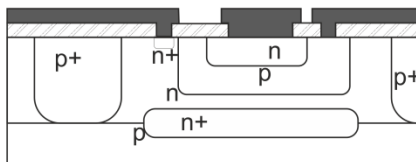
Рис.47

Задание: замените все процессы нанесения пленок на их эпитаксию, измените имплантацию мышьяка на фосфор и настройте технологический процесс таким образом, чтобы характеристики структуры практически не изменились.

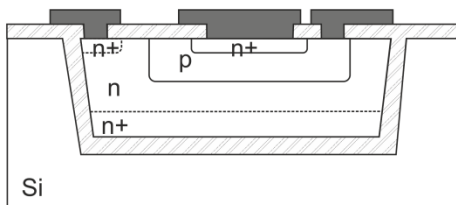
ЗАДАНИЕ НА ОТЧЕТ ПО КУРСУ. Изготовление собственного прибора

Варианты 1 и 2.

Эпитаксиально-планарная структура
со скрытым n^+ слоем

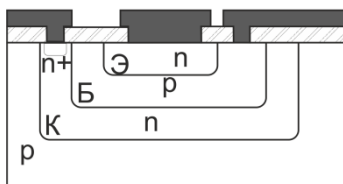


Структура с диэлектрической изоляцией

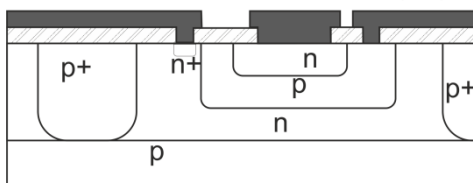


Варианты 3 и 4.

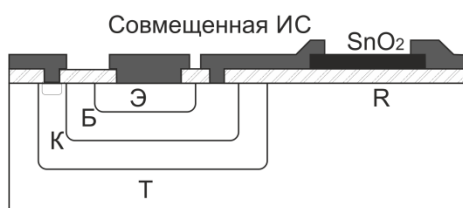
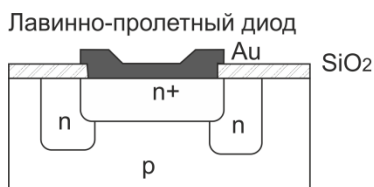
Диффузионно-планарная структура



Эпитаксиально-планарная структура

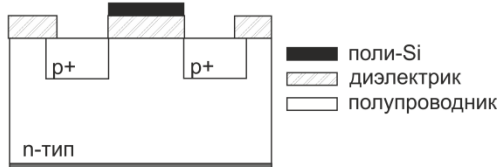


Варианты 5 и 6.

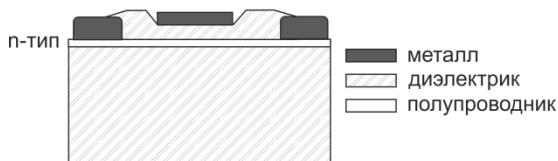


Варианты 7 и 8.

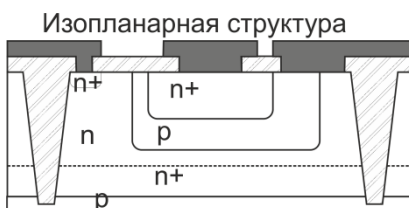
МДП транзистор с кремниевым затвором



Тонкопленочный полевой транзистор



Варианты 9 и 10.

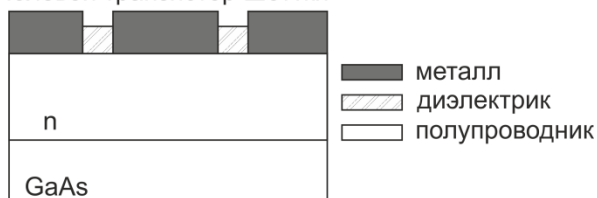


КМДП КНС-структура

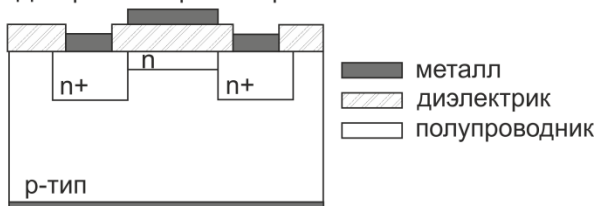


Варианты 11 и 12.

Полевой транзистор Шоттки

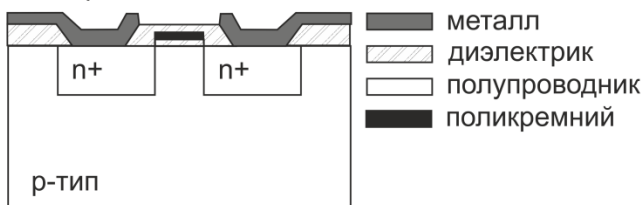


МДП транзистор со встроенным каналом n-типа

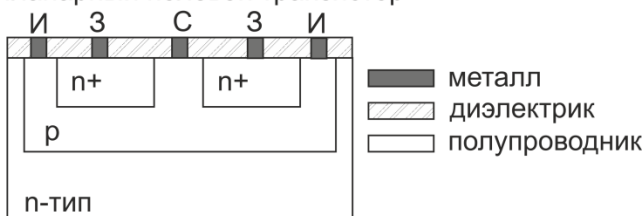


Варианты 13 и 14.

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

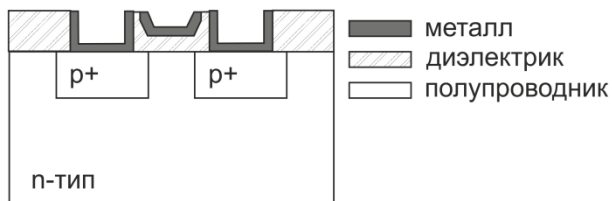


Планарный полевой транзистор

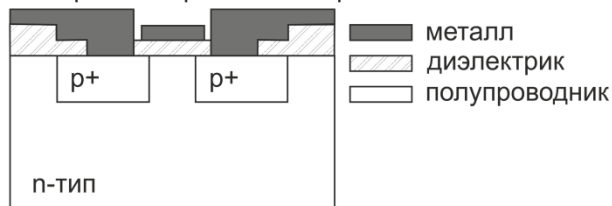


Варианты 15 и 16.

МДП транзистор с каналом p-типа



МОП транзистор с каналом p-типа



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 с.
5. Atlas User's Manual DEVICE SIMULATION SOFTWARE. Silvaco, Inc. 4701 Patrick Henry Drive, Bldg. 2 January 30, 2015, Santa Clara, CA 95054, 1669 с.
6. DeckBuild User's Manual. Silvaco, Inc. 4701 Patrick Henry Drive, Bldg. 2 January 30, 2015, Santa Clara, CA 95054, 220с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Лабораторная работа № 1	
Знакомство с редакторами Athena и Atlas. Исследование базовых компонентов полупроводниковой технологии: диода и МОП-транзистора	4
Лабораторная работа № 2	
Знакомство с редакторами Athena и Atlas. Исследование базовых компонентов полупроводниковой технологии: МОП и биполярного транзистора	21
Лабораторная работа № 3	
Технологические особенности процесса диффузии (часть 1)	34
Лабораторная работа № 4	
Технологические особенности процесса диффузии (часть 2)	54
Лабораторная работа № 5	
Основные параметры и технологические особенности процесса ионной имплантации	68
Лабораторная работа № 6	
Технология моделирования травления материалов	80
Лабораторная работа № 7	
Технологические особенности процесса окисления	93
Лабораторная работа № 8	
Послойное нанесение материалов	103
Лабораторная работа № 9	
Литографические процессы	110
Лабораторная работа № 10	
Выращивание эпитаксиальных пленок	123
Задание на отчет по курсу.	
Изготовление собственного прибора	132
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	136

Учебное издание

Арсентьев Алексей Владимирович
Плотникова Екатерина Юрьевна

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
И ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ:

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

В авторской редакции

Компьютерная верстка Е.Ю. Плотниковой

Подписано к изданию 15.04.2016.

Объем данных 5,5 Мб

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический
университет»

394026 Воронеж, Московский просп., 14