ФГБОУ ВО "Воронежский государственный технический университет"

Кафедра полупроводниковой электроники и наноэлектроники

XXX-2015

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Методы математического моделирования» для студентов направления 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника» (магистерская программа "Приборы и устройства в микро- и наноэлектронике") очной формы обучения



Воронеж 2015

Составители: канд. техн. наук А.В. Арсентьев, канд. техн. наук Е.Ю. Плотникова

УДК 621.382

Методические указания к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Методы математического моделирования» для студентов направления 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника» магистерская программа "Приборы и устройства в микро- и наноэлектронике") очной формы обучения / ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; сост. А.В. Арсентьев, Е.Ю. Плотникова. Воронеж, 2015. 29 с.

Методические указания направлены на ознакомление с основными принципами технологических процессов понятиями в области моделирования И математического моделирования. Важным элементом дисциплины является выработка навыков проектирования устройств технологических циклов производства наноэлектроники заланными с электрофизическими параметрами.

Методические указания содержат 4 лабораторные работы, включают моделирование четырех структур полевых транзисторов, проведенное в САПР ТСАD.

Ил.: 15. Библиограф.: 2 назв.

Рецензент д-р техн. наук, проф. А.В. Строгонов

Ответственный за выпуск зав. кафедрой д-р физ.-мат. наук, проф. С.И. Рембеза

Издается по решению редакционно-издательского совета Воронежского государственного технического университета

(с) ФГБОУ ВО Воронежский государственный технический университет 2015

Лабораторная работа №1 Моделирование объемного n-канального MOSFET

ЗАДАНИЕ: Провести моделирование по индивидуальному заданию планарного полевого транзистора. Построить ВАХ прибора. Освоить алгоритм типового моделирования в САПР ТСАD.

MOSFET (от слов «металл-оксид-полупроводник-управляемый-полем», англ. metal-oxidesemiconductor field effect transistor) - полевых транзисторов с изолированным затвором.

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

На рис.1 показана одна из возможных схем поперечного сечения n-канального объемного MOSFET с параметрами: длина канала L = 80 нм, толщина диэлектрика tox = 2 нм, глубина залегания перехода Xj = 30 нм, исток и сток n+ типа с равномерной концентрацией примеси 10^{20} см⁻³, подложка p-типа с концентрацией 10^{18} см⁻³. Для моделирования структуры воспользуемся САПР TCAD.



Рис. 1. п-канальный объемный MOSFET

Пошаговый алгоритм моделирования:

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

- 1.1: simulator specification определение используемого пакета для моделирования
- 1.2: mesh definition задание сетки
- 1.3: region definition задание областей
- 1.4: electrode specification задание электродов
- 1.5: doping specification легирование
- 1.6: contact specification задание контактов
- 2. Задание материалов для моделирования.

3. Задание методики расчета.

4. Получение предварительного расчета.

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

6. Вывод результатов на экран.

Программа для расчета объемного n-канального MOSFET

Программа для расчета объемного n-канального MOSFET
В редакторе DECKBUILD # обозначает комментарий, а не часть программы
Шаг 1: Создание структуры прибора
1.1 в каком приложении строим модель
go atlas

1.2 задание сетки mesh space.mult=1.0
задание сетки по оси х
loc обозначает местоположение и определяет положение линии сетки x.mesh loc=0.00 spac=0.01

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

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

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

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

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

doping uniform conc=2e18 p.type region=1 doping uniform conc=1e20 n.type x.left=0 x.right=0.05 y.min=0 y.max=0.03 doping uniform conc=1e20 n.type x.left=0.13 x.right=0.18 y.min=0 y.max=0.03 # 1.6 определение контактов

n.poly задает n+ легированный поликремний как материал контакта с работой выхода workfuction=4.17eV

contact name=gate n.poly contact name=source neutral contact name=drain neutral contact name=substrate neutral

#Шаг 2: Установка материалов модели models mos print

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

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

#Шаг 5: Запуск моделирования для получения графиков при разных смещениях затвора #pacчет нескольких кривых токов при изменении напряжения сток-исток solve vdrain=0.1 outf=solve_vdrain1 solve vdrain=0.2 outf=solve_vdrain2 solve vdrain=0.3 outf=solve_vdrain3 solve vdrain=0.4 outf=solve_vdrain4

степень изменения напряжения на затворе на отдельных кривых ток стока от напряжения сток-исток

load infile=solve_vdrain1

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

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

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

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

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



На рис. 2 показаны кривые зависимости $\rm I_d\text{-}V_{gs}$ MOSFET структуры при напряжениях стокисток 0,1, 0,2, 0,3 и 0,4 В.

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

Лабораторная работа №2 Моделирование КНИ МОП-структуры

ЗАДАНИЕ: Провести моделирование по индивидуальному заданию КНИ полевого транзистора. Построить ВАХ прибора. Научиться выводить структуры прибора (состав прибора, распределение по структуре концентрации примеси).

Полностью обедненный КНИ транзистор – это прибор, изготовленный на кремнии с использованием толстого слоя SiO₂ в качестве изолирующей подложки, на которой помещается область обеднения. КНИ технология может оказаться хорошей заменой классической планарной технологии. Толстый слой диоксида кремния является распространенным углубленным оксидным слоем (УОС). Область кремния над УОС – это область, в которой формируется приборная структура. Полностью обедненная КНИ структура имеет значительные преимущества над объемным кремниевым МОП, поскольку снижается емкость между стоком (истоком) и объемом прибора, уменьшаются токи утечки через затвор, убираются наводки; малые потери на диэлектрике вместе с большим сопротивлением КНИ подложек нашли широкое распространение в радиотехнике и при защите от воздействия радиации. КНИ структуры не только предотвращают «защелкивание» и улучшают защиту от ошибок в цифровых схемах, они также позволяют лучше контролировать канал, что улучшает подпороговый наклон и снижает эффектам плавающего напряжения. В этом примере с помощью ATLAS моделируется вариант КНИ МОП структуры, в которой возможно изменять параметры: длину затвора, концентрацию примесей и т.д.

Для моделирования используются блоки DECKBUILD, ATLAS и TONYPLOT.

Пошаговый алгоритм для моделирования КНИ МОП структуры.

1. Задаем и инициализируем используемые переменные.

Переменные могут быть полезны для изменения конкретных параметров, когда код запущен с уже заданными начальными условиями. Для повторного построения модели необходимо ввести команды, приведенные в теле программы ниже.

Программа для моделирования КНИ структуры # B DECKBUILD открываем ATLAS go atlas

#определение средней точки кремния толщиной sMp=tSi/2 set sMp=0.0125 #определение нижней границы кремния толщиной sTsi=tSi set sTsi=0.025 #определение нижней границы слоя оксида заданной толщины set sToxb=0.1 #определение начала верхнего (затворного) слоя оксида заданной толщины set sToxf=-0.002 #минимальное положение электрода затвора по оси x set gmin=1 # максимальное положение электрода затвора по оси x set gmax=2

2. Определяем схему структуры.

Первым шагом при определении структуры КНИ прибора является задание блока схемы с большинством интересующих параметров. Первой командой будет команда определения сетки прибора. Эта команда скажет ATLASy коэффициент пересчета для создаваемой сетки. В нашем случае прибор прямоугольный. По умолчанию симметрия ячейки прямоугольная.

Ячейка будет более маленькой для большего коэффициента и более большой для меньшего коэффициента сетки. Стандартный параметр установлен равным 1. Параметры ячейки вводятся как вертикальные и горизонтальные линии в мкм в виде расстояния от центральной линии. ATLAS использует сетку с треугольными ячейками.

mesh space.mult=1.0 #задание сетки по оси х x.mesh loc=0.00 spac=0.50 x.mesh loc=1.15 spac=0.02 x.mesh loc=1.5 spac=0.1 x.mesh loc=1.85 spac=0.02 x.mesh loc=3 spac=0.5

задание сетки по оси у y.mesh loc=\$sToxf spac=0.02 y.mesh loc=0.00 spac=0.005 y.mesh loc=\$sMp spac=0.02 y.mesh loc=\$sTsi spac=0.01 y.mesh loc=\$sToxb spac=0.25

3. Определение различных областей и присвоение им соответствующих номеров.

После определения ячеистой структуры необходимо задать области прибора. В случае КНИ МОП используются три области: (1) область подзатворного оксида для изоляции контакта затвора, (2) область кремния толщиной tSi и (3) углубленный оксид (УОС).

Эти области будут использованы для задания материалов и их параметров в приборе. Области должны задаваться по границам ячейки и параметры должны быть аналогичны используемым при задании ячейки (выше). ATLAS позволяет пользователю задавать порядка 200 различных областей в приборе. Если происходит пересечение двух областей, ATLAS будет использовать тип материала из области, которая была задана последней. Для того, чтобы ATLAS заработал, необходимо полностью описать все области двумерной структуры.

определение областей region number=1 x.min=0 x.max=3 y.min=\$sToxf y.max=0 material=Oxide region number=2 x.min=0 x.max=3 y.min=0 y.max=\$sTsi material=Silicon region number=3 x.min=0 x.max=3 y.min=\$sTsi y.max=\$sToxb material=Oxide

4. Определение имен каждого электрода.

Для того чтобы показать программе место расположения контактов затвора, истока и стока необходимо определить эти электроды в коде. Можно предположить, что возникнет несоответствие между технологией изготовления прибора и программированием в ATLASe (т.к. верхний окисел и электроды определяются раньше, чем легируется кремний). ATLAS предполагает, что структура уже определена. Поскольку электрод затвора находится выше верхнего диэлектрика, оба значения *у.min* и *у.max* могут быть соотнесены с *sTOXF(-0.002)*,

который переместит их поверх оксида, но не задаст толщину. Аналогично, контакты к подложке располагается под нижним оксидом.

определение электродов electrode name=gate number=1 x.min=\$gmin x.max=\$gmax y.min=\$sToxf y.max=\$sToxf electrode name=source number=2 x.min=0 x.max=0.5 y.min=0 y.max=0 electrode name=drain number=3 x.min=2.5 x.max=3 y.min=0 y.max=0 electrode name=substrate number=4 x.min=0 x.max=3 y.min=\$sToxb y.max=\$sToxb

5. Задание «контактов» и параметров границ.

Команда «contact» используется для того, чтобы сказать ATLASy как задействовать электроды. По умолчанию контакт к электроду омический. Если разработчик хочет получить контакт Шоттки, он должен использовать *wirkfunction*. Материал контакта затвора устанавливается к n^+ легированному поли кремнию параметром (*n.poly*). В другом случае (если не используется материал (*n.poly*), *workfunction* будет определен установкой параметра требуемого значения. Например, фраза «contact name=gate workfunction] из поликремния равна 4.17 эВ.

Процесс производства, независимо от того, кок его проводить, задействует параметры на границе SiO₂-Si, что значительно влияет на электрические параметры прибора. Состояния на границе, не важно - врожденные, полученные при проведении процессов или возникшие при работе, оказываются причиной деградации параметров прибора (крутизна характеристики, подвижность носителей, пороговое напряжение) и сильно снижает надежность и время жизни прибора. Параметр «interface» используются для определения плотности зарядов на границе полупроводник-диэлектрик. Он показывает, что вся граница между полупроводником и диэлектриком имеет постоянный заряд 3×10^{10} Кл/см².

contact name=gate n.poly interface qf=3e10 contact name=source neutral contact name=drain neutral contact name=substrate neutral

6. Определение параметров легирования МОП структуры.

Следующим действием является введение примеси. Silvaco позволяет разработчику задавать тип легирующей примеси и концентрацию. Оно также задать распределение примеси. ATLAS может распределять примеси равномерно, по методу Гаусса или другому поддерживаемому профилю. Для нашего прибора все примеси будут определены в области 2, в которой расположен Si. В начале задается полное легирование р-типом на всей области. За ним следует легирование распределением Гаусса носителей п-типа для создания областей истока и стока. Концентрации, записанные в команде легирования по Гауссу для истока и стока имеют максимум = 1×10^{20} см⁻³ при y = 0 и параметр = 0.05, который является характеристикой длины имплантации (стандартное отклонение), для которой уровень легирования вертикально упадет. Поперечное падение уровня легирования по оси х определяется параметром *lat.char*.

#легирование p-типом c pавномерным pacпределением концентрации по всему кремнию doping uniform conc=2e17 p.type direction=y regions=2 #легирование профилем Гаусса области истока doping gaussian characteristic =.05 conc=1e20 n.type x.left=0 x.right=\$gmin y.top=0 lat.char=0.05 direction=y

легирование профилем Гаусса области стока

doping gaussian characteristic =.05 conc=1e20 n.type x.left=\$gmax x.right=3 y.top=0 lat.char =.05 direction=y

7. Сохранение и вывод программы на дисплей.

Параметр «master» после имени выходного файла означает, что выходной файл будет записан как файл стандартной структуры, а не в бинарном формате. Изготовленная МОП структура выводится с помощью TonyPlot.

struct outf=SOI.str master tonyplot SOI.str

8. Выбор моделей.

В нашей модели для определения стандартной зависимости подвижности от концентрации (conmob) и подвижности от параллельного поля (fldmob) выбрано влияние скорости насыщения. Для статистики носителей заряда выбраны функция Ферми-Дирака и сужение запрещенной зоны. Параметры *evsatmod* и *hvsatmod* с присоединенными *b.electrons* и *b.holes* используются для детального определения зависимости от приложенного поля. Генерация и рекомбинация – это процессы, посредством которых полупроводниковый материал выводится из термодинамического равновесия и возвращается назад. Выбраны модели для рекомбинации Шокли-Рида-Холла (SRH) и Аугера.

При наличии сильного легирования (более 10¹⁸ см⁻³) р-п переход в кремнии становится зависимым от количества примесей. При росте легирования уменьшается запрещенная зона, поскольку зона проводимости снижается настолько, насколько поднимется валентная зона.

определение модели

models auger srh conmob fldmob b.electrons=2 b.holes=1 evsatmod=0 hvsatmod=0 bgn temperature=300

9. Определение численных методов.

Метод Ньютона выбирается с максимальным приближением до 25. Для решения проблемы расхождения решений с малым начальным приближением используется параметр «trap», в котором *maxtrap* – это максимально возможное количество «хвостов» (по умолчанию = 4) с наклоном шага, уменьшаемым параметром, известным как *atrap*. Для улучшения характеристик при медленной сходимости используется метод Ньютона-Ричардсона (вариация метода Ньютона), задаваемый параметром *autonr*.

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

10. Определение заданных смещений.

Для определения профиля легирования при нулевом смещении необходимо определить начальные приближения напряжений и концентрации носителей посредством параметра «solve init», если нет предварительных вычислений. Если проектировщик пропустит это условие, ATLAS автоматически задаст их перед получением первого «solve».

Сложнее всего получить хорошее схождение двух первых ненулевых параметров, поскольку используется расчет при нулевом смещении, задаваемый с помощью «solve init» как мягкое начальное приближение. Поэтому для расчета двух первых ненулевых параметров необходимо использовать небольшое напряжение.

Установить начальные значения и рассчитать# посчитать прибор при нулевом смещенииsolve init

посчитать прибор при изменении напряжения сток-исток сначала с шагом 0.01, далее с шагом 0.05 и наконец, с шагом 0.1

два первых ненулевых расчета при малых смещениях сток-исток solve vdrain=0.01 solve vdrain=0.02 solve vdrain=0.1

#Получение Id-Vds характеристик при разных Vgs solve vgate=1.0 outf=solve_vgate1 solve vgate=1.5 outf=solve_vgate2 solve vgate=2.0 outf=solve_vgate3 solve vgate=2.5 outf=solve_vgate4

load infile=solve_vgate1 log outf=SOI11.log solve name=drain vdrain=0 vfinal=2.0 vstep=0.1

load infile=solve_vgate2 log outf=SOI21.log solve name=drain vdrain=0 vfinal=2.0 vstep=0.1

load infile=solve_vgate3 log outf=SOI31.log solve name=drain vdrain=0 vfinal=2.0 vstep=0.1

load infile=solve_vgate4 log outf=SOI41.log solve name=drain vdrain=0 vfinal=2.0 vstep=0.1



Рис. 3. Схема поперечного сечения полностью обедненного n-канального КНИ МОП

11. Вывод на экран результатов моделирования.

```
# Отображение на графике всех log файловtonyplot -overlay SOI11.log SOI21.log SOI31.log SOI41.log# выход из программыquit
```



Рис. 4. График зависимости тока стока от напряжения сток-исток при разных напряжениях на затворе Vgs = 1.0B, 1.5B, 2.0B и 2.5B, соответственно, для п-канального полностью обедненного КНИ MOSFET (оси менять вручную)



Рис. 5. Распределение концентраций по структуре



Рис. 6. Структура КНИ MOSFET

Лабораторная работа №3 Моделирование 0,18 мкм объемного n-МОП транзистора с круговой имплантацией

ЗАДАНИЕ: Провести моделирование по индивидуальному заданию 0,18 мкм объемный n-MOII транзистор с круговой имплантацией. Построить ВАХ прибора. Освоить работу в редакторе технологического моделирования Athena.

Моделируется прибор LDD 0,18 мкм п-канальный МОП (со слабо легированными истоком и стоком). Прибор был изготовлен на кремниевой подложке с ориентацией <100>. Подложка ртипа была получена легированием бором 3×10^{15} см⁻³. Область n⁻ - типа формируется имплантацией дозой 10^{15} см⁻³, область n⁺ - типа - 5×10^{15} см⁻³ мышьяка. Ячейка определяется для половины симметричной МОП структуры. После всех шагов изготовления структура будет отзеркалена для изготовления полного МОП транзистора. Новые шаги созданы для моделирования n-канального МОП сразу после извлечения параметров МОП. Состояние МОП структуры и влияние последующих шагов процесса можно отобразить вставкой команды для прорисовки структуры (tonyplot structure_name.str) после каждого шага.

Пошаговый алгоритм моделирования.

1. Задание ячейки и описание структуры.

начало работы в симуляторе технологических процессов ATHENA

go Athena

Задание сетки по оси x line x loc=0.15 spac=0.1

line x loc=0.15 spac=0.1 line x loc=0.2 spac=0.006

line x loc=0.2 spac=0.000

line x loc=0.6 spac=0.01

Задание сетки по оси у

line v loc=0.0 spac=0.002

line y loc=0.2 spac=0.002

line y loc=0.5 spac=0.05

line y loc=0.8 spac=0.15

structure declaration

struct outfile=nmos_bulk.str

2. Задание кремниевой подложки с ориентацией 100 и легированием бором 10¹⁵ см⁻³. Пространственный умножитель (Space.mult = 2) используется для ускорения процесса. Уменьшение параметра пространственного умножителя используется для получения большей точности.

init orientation=100 c.boron=1.0e15 space.mul=2

3. Выращивание тонкого гладкого слоя SiO_2 толщиной от 10 до 15 нм на подложке для уменьшения влияния канала и предотвращения загрязнения подложки. Простейший метод нанесения в АТНЕNA – это согласованное (обладающий свойствами постоянства растяжений и сохранения углов) нанесение. Оно используется, когда точность формы наносимого слоя не критична. Сухое окисление проводится в течение 30 минут при 1000°С. Последующее стравливание формирует равномерное покрытие оксидом толщиной 0.02 мкм.

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

etch oxide thick=0.02

4. Для имплантации бора в размере 8.0×10^{12} ионов/см² с энергией 100 КэВ по умолчанию используется двойная модель Пирсона. Канал п-типа в МОП транзисторе должен быть сформирован на кремнии р-типа, так как этот материал под затвором должен быть противоположного типа проводимости. Следовательно, следующими шагом является имплантация бора для формирования р-кармана на подложке. Изготовление п-канального МОП транзистора может быть проведено с подложки р-типа, но в классической технологии имплантацией формируется карман р-типа. АТНЕNA предлагает 3 модели имплантации; (1) двойного Пирсона (по умолчанию), (2) одинарного Пирсона и (3) Монте-Карло.

implant boron dose=3.0e13 energy=200 pearson

5. Перемещение атомов по решетке и занятие необходимых позиций. В результате ионной имплантации максимальное количество примеси оказывается на средней глубине проникновения в зависимости от особенностей внедрения примеси. Для того, чтобы увеличить равномерность легирования, подложку подогревают до высоких температур, в следствие чего атомы бора получают достаточное количество энергии для перемещения по кристаллической решетке и более равномерного распределения по подложке. Если подогрев происходит в атмосфере кислорода, то формируется оксидная пленка. В данном случае используется влажное окисление.

diffus temp=950 time=100 weto2 hcl=3

6. Дальнейшее перемещение р-области в подложку и увеличение равномерности легирования использованием нескольких операций диффузии при разных температурах, что позволяет хорошо управлять процессом.

diffus time=50 temp=1000 t.rate=4.000 dryo2 press=0.10 hcl=3 diffus time=220 temp=1200 nitro press=1 diffus time=90 temp=1200 t.rate=-4.444 nitro press=1

7. Удаление всех слоев оксидов для получения поверхности, на которой будет проходить процесс задания физических параметров MOSFET.

etch oxide all

8. Стравливание поверхности для того, чтобы поверхность не загрязнялась из-за предыдущих операций. В этом процессе тонкий слой поликремния сначала окисляется, а затем полученный оксид удаляется.

diffus time=20 temp=1000 dryo2 press=1 hcl=3 etch oxide all

9.Фоормирование подзатворного диэлектрика окислением в сухом кислороде. Толщина оксида является важным параметром при определении характеристик MOSFET и контролируется временем и температурой осаждения.

diffus time=3 temp=895 dryo2 press=1.00 hcl=1

10. Задание порогового напряжения имплантацией бора через подзатворный диэлектрик. Увеличение дозы имплантации бора приводит к увеличению порогового напряжения, инвертировать канал р-типа сложнее.

implant boron dose=1.5e13 energy=45 pearson

11. Конформное (обладающий свойствами постоянства растяжений и сохранения углов) нанесение поликремния для создания затвора.

depo poly thick=0.2 divi=10

12. Начало формирования рельефа поликремниевого затвора стравливанием 0,35 мкм слева.

etch poly left p1.x=0.51

13. Имплантация через нанесенный диэлектрик t областей истока/стока.

method fermi compress diffuse time=5 temp=900 weto press=0.8 implant arsenic dose=1.0e15 energy=30 pearson

14. Имплантация кольца р-типа.

implant boron dose=3.0e13 energy=15 tilt=30 fullrotat

15. Изготовление оксидного ограничителя для того, чтобы обеспечить изоляцию и сохранить границы для дальнейшей имплантации.

depo oxide thick=0.10 divisions=8 etch oxide dry thick=0.10

16. Формирование сильно-легированных областей истока и стока имплантацией мышьяка вместо фосфора, который используется для изготовления слабо-легированных истока и стока.

implant arsenic dose=5e15 energy=60 pearson

17. Отжиг в атмосфере азота для диффузии сформированных ранее истока и стока.

method fermi compress diffuse time=1 temp=1000 nitro press=1.0

18. Удаление оксида над областями истока и стока для нанесения металлических контактов к истоку и стоку.

etch oxide left p1.x=0.35

19. Нанесение алюминия в качестве низкоомных контактов.

deposit alumin thick=0.03 divi=2

20. Удаление излишков металла

etch alumin right p1.x=0.33

21. «Отзеркаливание» структуры для получения симметричного прибора

structure mirror right

22. Определение местоположения электродов и сохранение собранной структуры

electrode name=gate x=0.59 y=0.1 electrode name=source x=0.2 electrode name=drain x=1.0 electrode name=substrate backside save outfile=nmos_bulk.str

23. «Извлечение» параметров МОП структуры и построение графика

расчет толщины подзатворного диэлектрика extract name="gateox" thickness oxide mat.occno=1 x.val=0.59

расчет глубины залегания p-n перехода Xj extract name="nxj" xj silicon mat.occno=1 x.val=0.2 junc.occno=1

pacчет поверхностного сопротивления n++ областей
extract name="n++ sheet rho" sheet.res material="Silicon" mat.occno=1 x.val=0.2
region.occno=1

расчет слоя rho под защитным покрытием, области LDD

extract name="ldd sheet rho" sheet.res material="Silicon" mat.occno=1 x.val=0.49 region.occno=1

расчет поверхностной концентрации в канале

extract name="chan surf conc" surf.conc impurity="Net Doping" material="Silicon" mat.occno=1 x.val=0.6

построение графиков структуры tonyplot nmos_bulk.str

Программа для расчета различных параметров, порогового напряжения и Ids-Vgs характеристик работает со структурой, сгенерированной в блоке ATHENA. Пороговое напряжение

рассчитывается с помощью определения пересечения максимального наклона кривой Ids-Vgs с осью х. Расчётные значения выводятся далее в нижней части окна DECKBUILD после запуска кода на генерацию модели.

go atlas

импортирование структуры для автоматического пересчета из ATHENA в ATLAS mesh inf=nmos_bulk.str

задание модели models cvt srh numcarr=2

особенности методики расчета

```
method newton itlimit=25 trap atrap=0.5 maxtrap=4 autonr nrcriterion=0.1 tol.time=0.005 dt.min=1e-25
```

расчет зависимости Id-Vgs с изменением напряжения на затворе и сохранение результатов в log файл

solve init solve vdrain=0.1 log outf=bulkHalo.log master solve name=gate vgate=0.1 vfinal=1.5 vstep=0.1

построение графика log файла tonyplot bulkHalo.log

```
# расчет порогового напряжения
extract name="vt" (xintercept(maxslope(curve(abs(v."gate"),abs(i."drain"))))
abs(ave(v."drain"))/2.0)
quit
```

Результаты моделирования.



Рис. 7. Зависимости Id-Vgs (BAX) для п-канального МОП транзистора



Рис. 8. Структура п-канального МОП транзистора



Рис. 9. Распределение примеси по структуре n-канального МОП транзистора

Лабораторная работа №4 Объемная инверсия в двухзатворном МОП-транзисторе (DG MOSFET)

ЗАДАНИЕ: Провести моделирование по индивидуальному заданию двухзатворного МОП транзистор. Построить ВАХ прибора. Расчитать характеристики DIBL и SS.

При достижении КМОП технологией своих пределов масштабирования одним из методов решения проблемы изготовления высококачественных маломощных приборов оказывается переход к двухзатворным МОП транзисторам (DG MOSFET). Считается, что DG MOSFET (в котором канал управляется напряжением на затворе, а не током, текущим от стока к истоку) превосходит классические однозатворные МОП структуры по электростатическим параметрам, поскольку в нем проводимость канала в значительной степени завязана на контакт затвора.



Рис. 10. Размеры структуры двухзатворного МОП транзистора

Использование симметричного DG MOSFET позволяет снизить такие эффекты короткого канала, как снижение высоты потенциального барьера при приложении потенциала к стоку (DIBL) и ухудшение подпорогового наклона характеристики. В результате исчезает необходимость использования сильного легирования канала и значительных градиентов концентраций носителей заряда по сравнению с классическими объемными MOSFET. Симметричность DG MOSFET говорит о том, что одинаковые напряжения, приложенные к обоим затворам, будут иметь одну и ту же работу выхода. Использование собственного полупроводника в качестве объемной области транзистора обеспечивает рост подвижности посредством снижения рассеяния заряда на примесях и лучшую стабильность параметров транзисторов исключением статистической функции концентрации легирующей примеси. Таким образом, в DG MOSFET не используется процесс легирования основы структуры, хотя обычно при изготовлении транзистора возникает непреднамеренное легирование порядка 10^{15} см⁻³. Таким образом, целью моделирования будет создание слаболегированного DG MOSFET.

В данной работе редактор ATLAS используется для моделирования 50 нм DG n-MOSFET с резкими переходами на границах областей истока и стока ($L_{eff} = L_{met} = 50$ нм).

В качестве параметров структуры заданы:

- ширина канала W = 50 нм,

- длина канала L = 50 нм,

- толщина кремниевого канала t_{Si} = 20 нм,
- эквивалентная толщина подзатворного диэлектрика t_{ox} = 2 нм,
- концентрация легирующей примеси кремниевого канала $N_A = 10^{15}$ см⁻³,
- концентрация легирующей примеси областей истока и стока $N_D = 10^{20}$ см⁻³,
- металлический затвор со средней работой выхода 4,74 эВ.

Пошаговый алгоритм моделирования. # Код создания структуры DG MOSFET # начало работы в симуляторе технологических процессов Atlas go atlas

mesh space.mult=1.0

mesh definition in x direction x.mesh loc=0.00 spac=0.01 x.mesh loc=0.05 spac=0.001 x.mesh loc=0.075 spac=0.005 x.mesh loc=0.1 spac=0.001 x.mesh loc=0.15 spac=0.01

mesh definition in y direction y.mesh loc=-0.002 spac=0.001 y.mesh loc=0 spac=0.0004 y.mesh loc=0.01 spac=0.001 y.mesh loc=0.02 spac=0.0004 y.mesh loc=0.022 spac=0.001

region definition
region num=1 y.min=0 y.max=0.02 silicon
region num=2 y.min=-0.002 y.max=0 oxide
region num=3 y.min=0.02 y.max=0.022 oxide

electrode definition

electrode name=gate number=1 x.min=0.05 x.max=0.1 top electrode name=gate1 number=2 x.min=0.05 x.max=0.1 bottom electrode name=source number=3 left length=0.05 y.min=0 y.max=0 electrode name=drain number=4 right length=0.05 y.min=0 y.max=0

doping specification
doping uniform conc=1e15 p.type region=1

doping uniform conc=1e20 n.type x.left=0 x.right=0.05 region=1 doping uniform conc=1e20 n.type x.left=0.1 x.right=0.15 region=1

сохранение структуры в файл и вывод данных на экран save outfile=dgmos.str tonyplot dgmos.str



Рис. 11. Размеры структуры двухзатворного МОП транзистора в TCAD

В данной модели не учитываются квантовые эффекты удержания, так как в структуре толщина и длина кремниевой пленки больше 10 нм. Квантовое механическое туннелирование от истока к стоку (через барьер) ухудшает характеристики прибора в случае короткоканальных структур, а в случае канала более 10 нм длиной МОП-транзистор ведет себя классическим образом.

Потенциал поверхности ψ_S является одним из наиболее подходящих параметров для описания физики работы МОП структуры. Он определяется как разница между электростатическим потенциалом на границе SiO₂/Si и потенциалом нейтральной объемной области, возникающих из-за искривления границ энергетических зон.

Program for obtaining variation of surface and body center potential

go atlas

IMPORT THE MESH structure mesh inf=dgmos.str

contact specification
contact name=gate n.poly workfunction=4.74

two separate electrodes gate and gate1 are shorted by "common" parameter contact name=gate1 n.poly workfunction=4.74 common=gate

quit

contact name=source neutral contact name=drain neutral

model declaration
models auger srh conmob fldmob bgn temperature=300

method definition
method newton itlimit=25 trap

solution for specific gate and drain bias solve init solve vdrain=0.0 solve vgate=0.0

saving the structure file
save outf=dg.str

extraction of surface potential where y.val=0.0 (semiconductor front gate oxide interface) along the depth and saving the curve in a file

extract name="srp_profile1" curve(depth, potential material="Silicon" mat.occno=1 y.val=0.0) outfile="extract1.dat"

extraction of channel center potential where y.val=0.01 (center of the SOI silicon semiconductor body y=tSi/2) along the depth and saving the curve in a file

extract name="srp_profile2" curve(depth, potential material="Silicon" mat.occno=1 y.val=0.01) outfile="extract2.dat"

plot the files in the same window overlaid tonyplot -overlay extract1.dat extract2.dat quit

На рис. 12 показано изменение потенциалов на поверхности и в глубине канала. На рис. 13 представлена зависимость поверхностного (ψ_s) потенциала и потенциала глубины канала (ψ_0) от подаваемого на затвор напряжения V_{gs} при заданном напряжении сток-исток V_{ds} (в примере $V_{ds} = 0$ В). Однако в TCAD есть возможность рассчитывать потенциалы при разных напряжениях на затворе и стоке.



Рис. 12 Распределение потенциалов на поверхности и в глубине канала



Рис. 13. Зависимость поверхностного (ψ_S) потенциала и потенциала глубины канала (ψ_0) от подаваемого на затвор напряжения V_{gs} при заданном напряжении сток-исток V_{ds}

На рисунке 13 приводится зависимость поверхностного (ψ_S) потенциала и потенциала глубины канала (ψ_0), рассчитанная при изменении напряжения на затворе от 0 до 1,5 В с шагом 0,1 В с пересчетом на каждом шаге. Видно, что в области перед порогом, в которой заряд полупроводника мал, есть объемная инверсия, а потенциалы примерно равны по всей толщине кремниевой пленки и оба стремятся к напряжению на затворе. После того, как напряжение на затворе становится больше порогового, плотность электронов становится значительной. В результате ψ_S продолжает медленно расти, а ψ_0 выходит на насыщение. Подвижные заряды возле границ канала экранируют поле затвора от объема канала, так что ψ_S и ψ_0 разделяются

(отсутствует объемная инверсия). Зависимости потенциалов канала от напряжения на затворе для транзистора с одинаковой длиной канала и разными толщинами имеют точку пересечения, показанную на рис. 13.

Program to obtain Id-Vgs characteristics

go atlas

IMPORT THE MESH mesh inf=dgmos.str

contact specification
contact name=gate n.poly workfunction=4.74
contact name=gate1 n.poly workfunction=4.74 common=gate
contact name=source neutral
contact name=drain neutral

model declaration models auger srh conmob fldmob bgn temperature=300

method definition
method newton itlimit=25 trap

initial solution and drain bias specification
solve init
solve vdrain=0.05
#solve vdrain=0.1
#solve vdrain=0.5
#solve vdrain=1.5

output log file declaration
log outf=dg1.log

solution to obtain solution for id-vgs characteristics by ramping Vgs solve name=gate vgate=0 vfinal=1.2 vstep=0.05

plotting the structure tonyplot dg1.log quit



Рис. 14. Результаты моделирования зависимости тока стока от напряжения затвор-исток ($I_D(V_{GS})$), рассчитанные при низком ($V_{DS} = 0.05$ В) и высоком ($V_{DS} = 1.5$ В) напряжении сток-исток



Рис. 15. Пример расчета характеристик DIBL и SS

Из полученных кривых, используя пример на рис. 15, определить снижение высоты потенциального барьера при приложении потенциала к стоку (DIBL) и ухудшение подпорогового наклона характеристики. Смещение по оси напряжений - рассчитывается как отношение разности смещения кривых (мВ) к разности подаваемых на сток потенциалов, а величина подпорогового наклона кривых (SS), которая определяется как наклон зависимости $I_D(V_{GS})$ в подпороговой области. Рассчитывается как увеличение (мВ) напряжения на затворе, которое требуется для увеличения тока стока в 10 раз.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. Cherie R. Kagan, Paul Andry. Thin-film transistors., IBM T.J. Watson Research Center, Yorktown Heights, New York, U.S.A. ISBN 0-8247-0959-4
- John F. Wager, Transparent Electronics., ISBN 978-0-387-72341-9, e-ISBN 978-0-387-72342-6, Library of Congress Control Number: 2007932718, © 2008 Springer Science+Business Media, LLC

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Методы математического моделирования» для студентов направления 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника» (магистерская программа "Приборы и устройства в микро- и наноэлектронике") очной формы обучения

> Составители: Арсентьев Алексей Владимирович Плотникова Екатерина Юрьевна

> > В авторской редакции

Компьютерный набор А.В. Арсентьева, Е.Ю. Плотниковой

Подписано к изданию 26.11.2015. Уч.-изд. л. Х,Х.

ФГБОУ ВО "Воронежский государственный технический университет" 394026 Воронеж, Московский просп., 14