

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

**Моделирование
полевых полупроводниковых приборов
в САПР ISE TCAD**

Учебное пособие для вузов

Составители: В.В. Ассессоров
Г.В. Быкадорова
А.Ю. Ткачев

**Воронеж
2007**

Утверждено научно-методическим советом физического факультета от 29 марта 2007 года протокол № 9.

Учебное пособие подготовлено на кафедре физики полупроводников и микроэлектроники физического факультета Воронежского государственного университета.

Рекомендуется для студентов 4 и 5 курсов физического факультета Воронежского государственного университета.

Для специальности: 010803 (014100) - Микроэлектроника и полупроводниковые приборы.

Содержание

1. Основы теории МДП транзисторов	4
2. Моделирование n-МОП транзистора в ISE TCAD.....	9
2.1. Проект в программе-оболочке GENESIS	9
2.2. Алгоритм моделирования технологии создания n-МОП транзистора	10
2.3. Создание физико-технологической модели n-МОП транзистора с помощью программы DIOS	12
2.4. Оптимизация расчетной сетки с помощью программы MDRAW	15
2.5. Расчет передаточной характеристики, определение порогового напряжения и крутизны характеристики n-МОП транзистора ..	17
2.6. Расчет семейства выходных характеристик, определение сопротивления сток-исток в открытом состоянии в линейной области и в области насыщения	20
2.7. Определение пробивного напряжения n-МОП транзистора	23
3. Задания и вопросы.....	26
Литература	26

1. Основы теории МДП транзисторов

Принцип действия МДП транзистора основан на изменении типа проводимости и концентрации носителей в приповерхностном слое полупроводника под действием внешнего управляющего электрического поля. МДП транзистор состоит из подложки, двух сильнолегированных областей с противоположным, относительно подложки, типом проводимости (сток и исток), и затвора из сильнолегированного поликремния или металла, отделенного от подложки слоем тонкого $\sim(100\div 500)$ нм подзатворного диэлектрика (рис. 1).

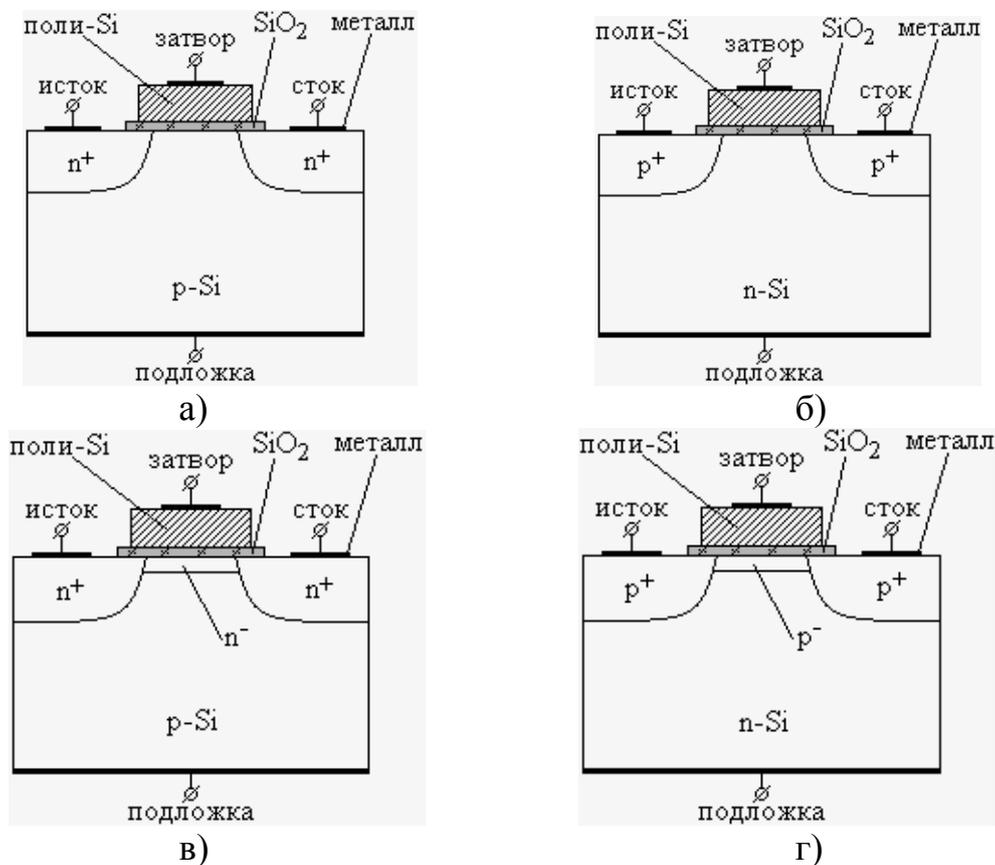


Рис. 1. Структура МДП транзисторов:

- а) n-канальный нормально закрытый; б) p-канальный нормально закрытый;
в) n-канальный нормально открытый; г) p-канальный нормально открытый.

Показанный на рисунке 1,а прибор работает следующим образом. В нормальном состоянии, когда напряжение на затворе $U_{zu} = 0$, сопротивление сток-исток очень велико, поскольку в структуре находятся два встречно включенных p-n перехода. При подаче на затвор положительного относительно подложки напряжения дырки из приповерхностного

подзатворного слоя кремния отталкиваются вглубь подложки электрическим полем, а электроны из подложки, наоборот, притягиваются. В результате под затвором образуется обедненная основными носителями область. По мере увеличения приложенного к затвору напряжения степень обеднения усиливается, но, в то же время, увеличивается обогащение неосновными носителями. При достижении порогового напряжения на затворе $U_{пор}$, когда концентрации электронов и дырок в поверхностном слое сравниваются, происходит инверсия типа проводимости приповерхностного слоя полупроводника. В результате образуется канал, соединяющий области стока и истока. В данном примере образуется канал n типа. Таким образом, при напряжении на затворе выше порогового сток и исток соединены каналом. Его проводимость управляется затворным напряжением, при изменении которого варьируется концентрация носителей в канале. В данном примере рассмотрен n-канальный транзистор, закрытый в нормальном состоянии, т. е. n-МОП транзистор обогащенного типа. Существуют p-МОП транзисторы обогащенного типа, а также p- и n-канальные транзисторы со встроенным каналом – это нормально открытые транзисторы, или транзисторы обедненного типа. Встроенный канал формируется обычно при помощи ионного легирования. Структура транзисторов этих типов показана на рисунке 1,б-г.

Рассмотрим n-канальный нормально закрытый транзистор с длиной канала $l_k \gg 1 \mu\text{м}$, т. е. длинноканальный транзистор, исток которого соединен с подложкой и заземлен (рис. 1,а).

При напряжении на затворе больше порогового и нулевом напряжении сток-исток $U_{cu}=0$ канал имеет одинаковую толщину по всей длине (рис. 2,а).

Если на сток подать положительное напряжение, то в цепи сток-исток потечет ток I_{cu} , величина которого регулируется затворным напряжением. Так как дополнительно к вертикальному электрическому полю, возникающему при подаче на затвор напряжения относительно подложки, в канале

появляется горизонтальное электрическое поле из-за разности потенциалов между стоком и истоком, толщина канала уменьшается по направлению к стоку (рис. 2,б). При некотором U_{cu} , называемым напряжением отсечки U_{omc} , толщина канала у стока станет равной нулю, а при дальнейшем увеличении напряжения U_{cu} канал будет все больше укорачиваться (рис. 2,в). Ток I_{cu} при этом увеличиваться практически не будет. Область рабочих параметров прибора, в которой канал существует от истока до стока, называется линейной областью, а область, в которой канал перекрыт, называется областью насыщения.

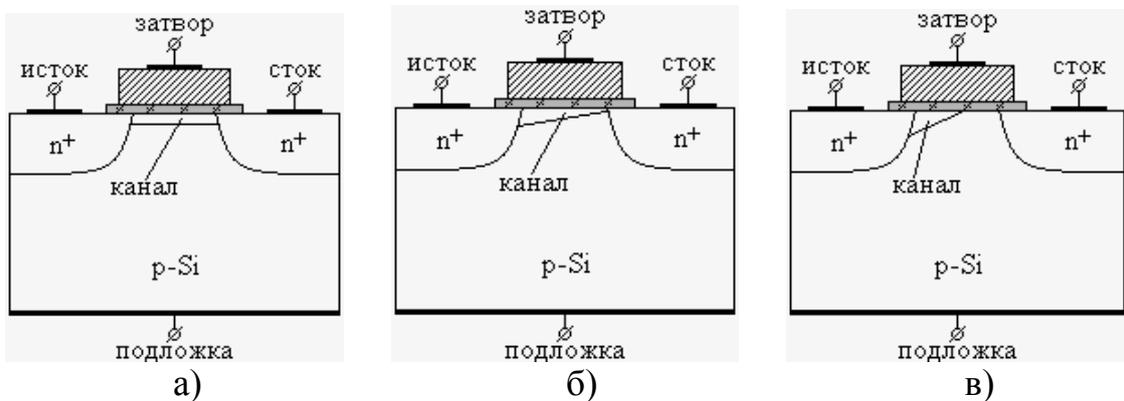


Рис. 2. Нормально закрытый n-канальный транзистор при:
 а) $U_{зи} > U_{пор}$ и $U_{си} = 0$; б) $U_{зи} > U_{пор}$ и $U_{си} > 0$; в) $U_{зи} > U_{пор}$ и $U_{си} > U_{насыщ}$.

Аналитические выражения для вольт-амперных характеристик МДП транзисторов на примере n-канального нормально закрытого транзистора имеют вид:

$$\text{в линейной области} \quad I_{cu} = \frac{b_k}{l_k} \mu_n C_{ox} \left[(U_{зи} - U_{пор}) U_{cu} - \frac{1}{2} U_{cu}^2 \right];$$

$$\text{в области насыщения} \quad I_{cu} = \frac{b_k}{l_k} \mu_n C_{ox} \frac{(U_{зи} - U_{пор})^2}{2},$$

где I_{cu} – ток стока; b_k – ширина канала; l_k – длина канала; μ_n – подвижность электронов в канале; C_{ox} – емкость МДП структуры; U_{cu} – напряжение на стоке относительно истока; $U_{зи}$ – напряжение на затворе относительно истока; $U_{пор}$ – пороговое напряжение транзистора.

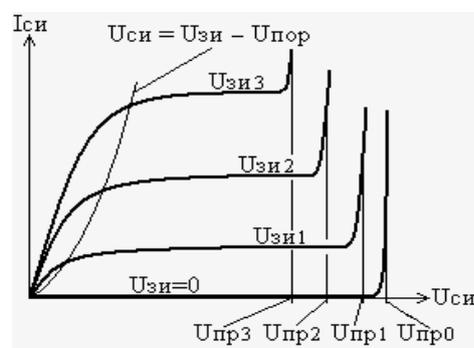
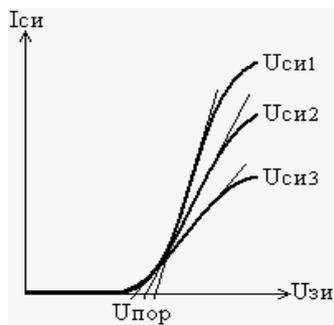
Если при фиксированном напряжении сток-исток снимать зависимость тока стока от напряжения на затворе, то мы получим передаточную

характеристику транзистора. Типичный вид передаточных характеристик приведен на рисунке 3,а. По передаточной характеристике можно определить пороговое напряжение и крутизну характеристики транзистора.

Пороговое напряжение определяется как точка пересечения касательной к наиболее линейному участку характеристики (т. е. проведенной через точку перегиба) с осью напряжения на затворе.

Крутизна S определяется как тангенс угла наклона этой касательной:

$$S = \left. \frac{\partial I_{cu}}{\partial U_{zu}} \right|_{U_c = const}$$



стока от напряжения сток-исток. Типичные выходные характеристики нормально закрытого n-канального транзистора представлены на рисунке 3,б. Перекрытие канала происходит при $U_{cu} = U_{zu} - U_{nop}$. Это парабола на рисунке 3,б, отделяющая линейную область режимов от области насыщения. Напряжение питания транзистора U_{num} обычно выбирается в области насыщения из-за более высокого значения крутизны S .

По выходным ВАХ транзистора можно определить его сопротивление сток-исток R_{cu} в закрытом и открытом состоянии:

$$R_{cu} = \left(\frac{\partial I_{cu}}{\partial U_{cu}} \right)^{-1} \Bigg|_{U_z = const} .$$

В закрытом состоянии транзистора сопротивление R_{cu} определяется при $U_{zu} = 0$ или при $U_{zu} = -U_{num}$. R_{cu} в открытом состоянии транзистора определяется при напряжении на затворе, гарантирующем полное открытие транзистора, обычно $U_{zu} = (3 \div 4)U_{nop}$. Сопротивление R_{cu} в открытом состоянии транзистора различается в линейной области при $U_{cu} \rightarrow 0$ и в области насыщения при $U_{cu} \rightarrow U_{num}$. Сопротивление R_{cu} в области насыщения также называют выходным сопротивлением стока $R_{вых}$.

При увеличении U_{cu} значительную роль начинает играть генерация электронно-дырочных пар путем ударной ионизации атомов кремния в области стокового p-n перехода. Скорость генерации $G_{avalanche}$ определяется выражением $G_{avalanche} = \alpha_n n v_n + \alpha_p p v_p$, где α_n, α_p – коэффициенты ионизации, или умножения, электронов и дырок, зависящие от U_{cu} ; n, p – концентрации электронов и дырок; v_n, v_p – скорости электронов и дырок. При достижении определенного напряжения U_{np} на стоке, называемого пробивным напряжением, начинается лавинная генерация носителей заряда из-за ударной ионизации, т. е. происходит пробой стокового p-n перехода, характеризуемый резким неконтролируемым увеличением тока стока. При этом, в общем случае, $\alpha_n, \alpha_p \rightarrow \infty$. Критерием пробоя является равенство единице электронного J_n или дырочного J_p интеграла ионизации:

$$J_n = \int_0^W \alpha_n(x) \cdot \exp\left(-\int_x^W (\alpha_n(x') - \alpha_p(x')) dx'\right) dx = 1;$$

$$J_p = \int_0^W \alpha_p(x) \cdot \exp\left(-\int_0^x (\alpha_p(x') - \alpha_n(x')) dx'\right) dx = 1,$$

где W – толщина p-n перехода. Используя данный критерий пробоя, можно определить напряжение пробоя. Приблизительно напряжение пробоя можно определить по стоковой ВАХ (рис. 3,б).

Аналогичные характеристики имеют p-канальные транзисторы, а также нормально открытые транзисторы [5].

2. Моделирование n-МОП транзистора в ISE TCAD

2.1. Проект в программе-оболочке GENESIS

В данном пособии рассматриваются принципы расчета основных параметров МОП транзисторов на примере проекта n-МОП транзистора с длинами канала 5, 3 и 1 мкм. Проект реализован в GENESISe, включает в себя моделирование технологии создания транзистора, оптимизацию расчетной сетки, расчет передаточной и выходных характеристик, определение порогового напряжения, крутизны передаточной характеристики, сопротивления сток-исток в открытом состоянии в линейной области и в области насыщения, пробивного напряжения.

Общий вид проекта показан на рисунке 4.

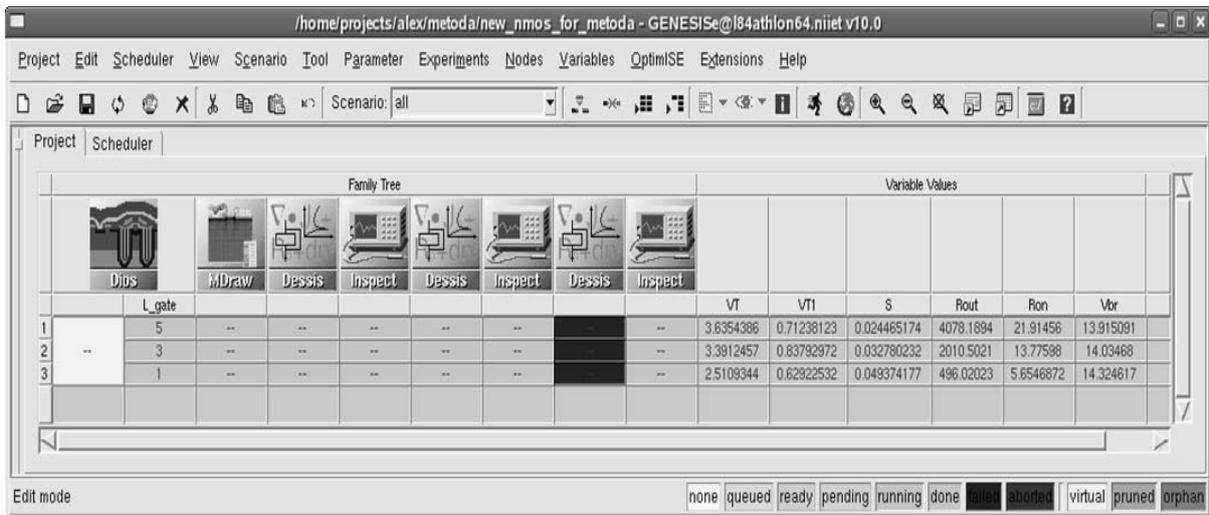


Рис. 4. Проект n-МОП транзистора в GENESISe.

Для создания проекта нужно последовательно добавить все необходимые программы. Первой добавляется программа DIOS для получения физико-технологической модели транзистора. Для программы DIOS нужно создать параметр L_{gate} со значениями 5,3,1 мкм. Тогда в результате расчета будут получены 3 транзисторных структуры с длиной канала соответственно 5,3,1 мкм. Далее добавляется программа MDRAW, используемая для оптимизации расчетной сетки моделируемых структур. Программу MDRAW необходимо настроить на использование командного файла, созданного пользователем, а также на использование файла границ от предыдущей программы, т. е. от DIOS. После этого добавляются 3 пары программ DESSIS и INSPECT. В DESSIS рассчитываются определенные электрофизические характеристики, которые затем с помощью INSPECT отображаются в графическом виде. В первой паре DESSIS+INSPECT рассчитывается передаточная характеристика транзисторной структуры, и определяются пороговое напряжение и крутизна характеристики. Пороговое напряжение определяется двумя способами: построением касательной и по уровню тока стока 0.1 мкА. Во второй паре рассчитывается семейство выходных стоковых характеристик при различных напряжениях на затворе и определяется сопротивление сток-исток в открытом состоянии в линейной области и в области насыщения. В третьей паре – пробивное напряжение сток-исток методом построения ВАХ.

Используемые при моделировании командные файлы будут рассмотрены ниже в соответствующих разделах.

2.2. Алгоритм моделирования технологии создания n-MOП транзистора

Алгоритм моделирования технологии изготовления представляет собой последовательность основных технологических операций в общем виде. В качестве примера рассмотрен один из возможных алгоритмов изго-

товления простейшего n-МОП транзистора с использованием планарной технологии.

1. Выращивание тонкого подзатворного окисла в сухом кислороде (рис. 5).
2. Осаждение поликремния (рис. 6).
3. Формирование затворной маски с помощью фотолитографии (рис. 7).
4. Анизотропное травление поликремния (рис. 8) с последующим удалением фоторезиста.
5. Ионное легирование примесью n-типа для создания истоковой, стоковой области и легирования поликремния (рис. 9).
6. Диффузионная разгонка имплантированной примеси (рис. 10).
7. Нанесение защитных слоев SiO_2 , Si_3N_4 и др. (рис. 11).
8. Формирование с помощью фотолитографии маски для контактных окон.
9. Вскрытие контактных окон и удаление фоторезиста (рис. 12).
10. Формирование контактов (рис. 13).



Рис. 5. Выращенный тонкий подзатворный окисел.

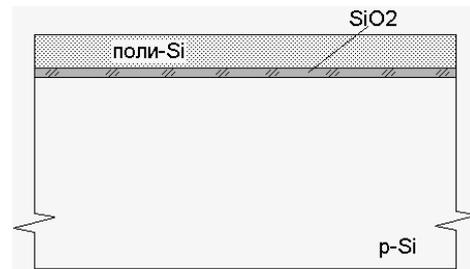


Рис. 6. Структура с осажденным поликремнием.

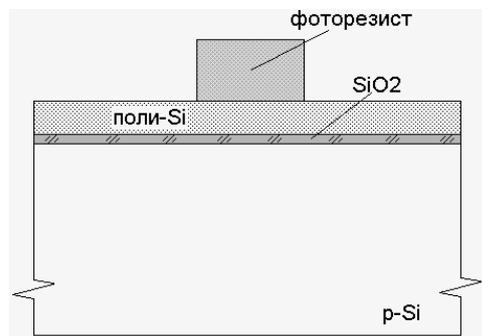


Рис. 7. Сформированная затворная маска из фоторезиста.

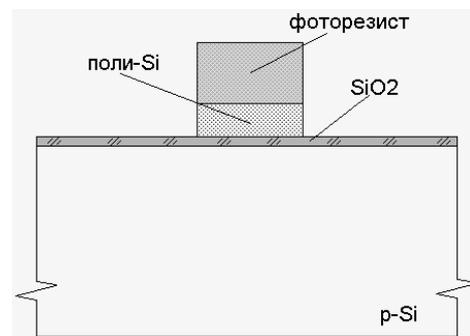


Рис. 8. Формирование затвора анизотропным травлением поликремния.

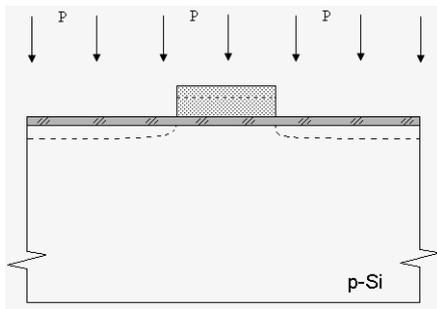


Рис. 9. Ионное легирование структуры фосфором.

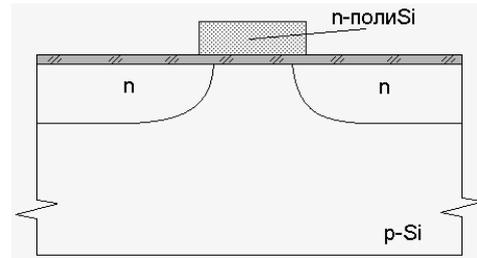


Рис. 10. Структура после разгонки имплантированной примеси. Созданы истоковая и стоковая области.

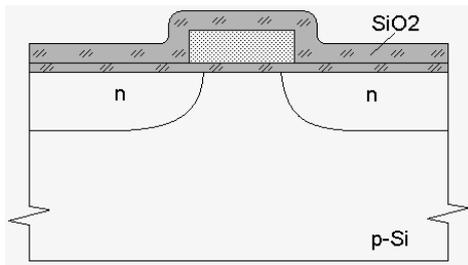


Рис. 11. Структура с осажденным защитным слоем SiO_2 .

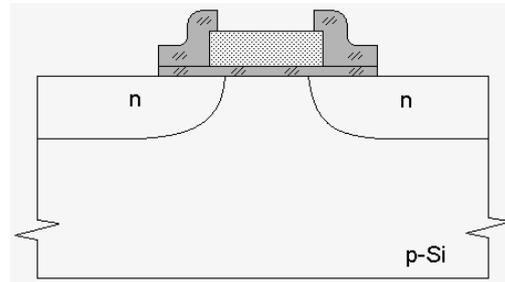


Рис. 12. Структура с вытравленными в защитном слое контактными окнами.

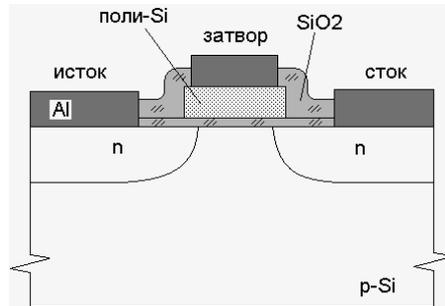


Рис. 13. Готовая структура со сформированными контактами.

2.3. Создание физико-технологической модели n-MOП транзистора с помощью программы DIOS

Используемый при создании физико-технологической модели n-MOП транзистора командный файл для программы DIOS приведен ниже. Топологические размеры вычисляются через параметр $@L_{gate@}$, заданный в GENESISe.

Title('n-MOS')

!-----Задание геометрических размеров и свойств подложки-----

! Определение области моделирования (половина симметричной структуры):

grid(x = (0.0, 3.5+@L_gate@/2) y = (-10.0, 0.0), nx=10)

! Задание свойств кремниевой подложки:

substrate (orientation = 100, element = B, conc = 1e15, ysubs = 0.0)

! Запуск графического окна и настройка расчетной сетки:

! MaxTrl - максимальное число разделений начальной ячейки сетки

! RefineGradient - максимальный уровень разделений в области высокого

! градиента концентрации примесей

! RefineMaximum = то же в области максимума концентрации примесей

! RefineJunction = то же в области p-n переходов

! RefineBoundary = то же на границе раздела материалов

Repl(Cont(MaxTrl = 10, RefineBoundary = -3, RefineGradient = -4,

RefineMaximum = -3, RefineJunction = -6, Resist(MaxTrl = 1), Ngra = 1))

graph(triangle = off, plot)

! Задание глобальных моделей ионной имплантации и диффузии:

implantation:(function = p4, lateralfunction = pe)

diffusion:(moddiff = equilibrium, Si:(B:(ModClust = Equilibrium)),

Si:(P:(ModClust = Equilibrium)))

! Имплантация бора:

implant(element = B, dose=3e12, energy = 20keV, tilt = 0)

comment('Gate oxidation')

! Выращивание подзатворного окисла с разгонкой бора:

diffusion(time = 10, temperature = 1100, atmosphere = O2)

comment('Polysilicon gate deposition')

! Осаждение поликремния:

deposit(material = po, thickness = 1000nm)

comment('Poly gate pattern')

! Фотолитографическое создание маски для травления поликремния:

mask(material = resist, thickness = 1000nm, xlef t= 0, xright =

0.2+@L_gate@/2)

comment('Poly gate etch')

! Анизотропное травление незакрытого маской поликремния:

etching(material = po, stop = oxgas, rate(anisotropic = 100))

! Удаление фоторезиста:

etching(material = resist)

comment('Poly oxidation')

! Окисление поликремния:

diffusion(time = 15, temperature = 1100, atmosphere = O2)

comment('Phosphorus implantation for source and drain regions')

! Легирование поликремния и совмещение затвора и истока:

implant(element = P, dose = 100/1.6e-13, energy = 50keV, tilt = 0)

```

comment('Nitride spacer')
! Осаждение защитного слоя из нитрида кремния:
deposit(material = si3n4, thickness = 700nm)
! Анизотропное травление нитрида для формирования нитридного
спейсера:
etching(material = si3n4, stop= oxgas, rate(anisotropic = 100), over = 10)
! Имплантация фосфора:
implant(element = P, dose = 1000/1.6e-13, energy = 50keV, tilt = 0)
comment('Diffuse of phosphorus')
! Диффузия фосфора:
diffusion(time = 3, temperature = 1000, atmosphere= O2)
comment('Contact windows')
! Маска для вытравливания контактных окон:
mask(material = resist, thickness = 1000nm, xleft = 0.15+@L_gate@/2,
xright = 1.85+@L_gate@/2)
! Травление оксида кремния:
etching(material = ox, remove = 200nm, rate(anisotropic = 100))
etching(material = resist)
comment('Deposit Al')
! Осаждение алюминия:
deposit(material = al, thickness = 1000nm)
comment('Contacts')
! Маска для формирования контактов:
mask(material = resist, thickness = 1000nm, xleft = 0.0, xright =
0.35+@L_gate@/2)
mask(material = resist, thickness = 1000nm, xleft = 1.7+@L_gate@/2,
xright = 3.5+@L_gate@/2)
! Травление алюминия:
etch(material = al, remove = 1600nm, rate(anisotropic = 100, isotropic = 10))
etch(material = resist)
comment('Full device structure')
! Зеркальное отражение относительно вертикальной оси x = 0 для
получения полной структуры МОП транзистора:
Reflect(Reflect = 0.0)
Comment('Saving final structure')
! Сохранение одномерных профилей распределения примесей:
ld(file = n@node@_x_channel, spe(netactive), ysect(-0.05), fac = -1)
ld(file = n@node@_y_channel, spe(netactive), xsect(0.0), fac = -1)
! Сохранение готовой структуры для последующего приборного
моделирования:
Save(File = 'n@node@', Type = mdraw, compress = off,
Contacts( contact1(name='gate', 0.0, 1.5)
contact2(name = 'source', -(2.5+@L_gate@/2), 0.5)
contact3(name= 'drain', 2.5+@L_gate@/2, 0.5)

```

contact4(name = 'substrate', location = bottom)))

Полученная в результате расчета модель МОП транзистора показана на рисунке 14. Профили распределения примесей в структуре приведены на рисунках 15,16.

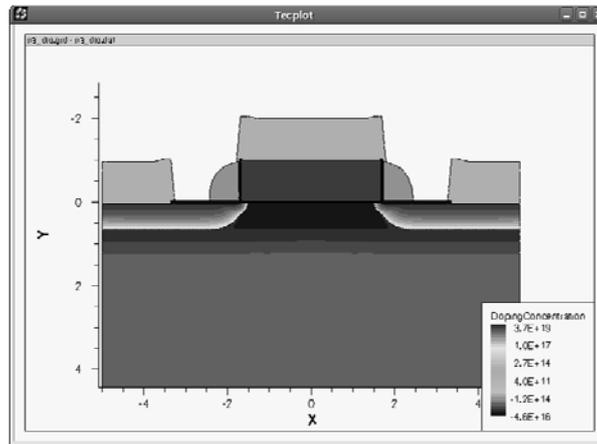


Рис. 14. Физико-технологическая модель n-МОП транзистора с длиной канала 3 мкм.

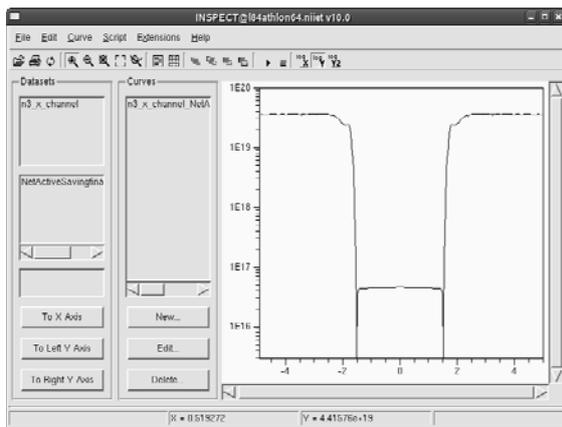


Рис. 15. Распределение концентрации примесей в приповерхностном слое модели n-МОП транзистора с длиной канала 3 мкм.

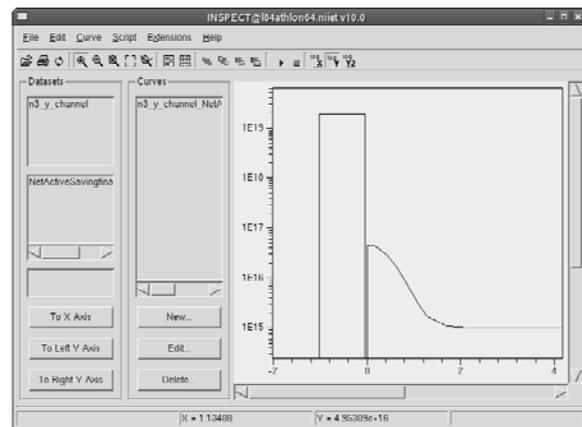


Рис. 16. Концентрационный профиль в вертикальном сечении, проходящем через середину структуры.

2.4. Оптимизация расчетной сетки с помощью программы MDRAW

Для оптимизации расчетной сетки модели n-МОП транзистора используется программа MDRAW под управлением представленного ниже командного файла.

Title "n-MOS"

Определение областей с изменяемой сеткой:

Definitions {

Вся структура по умолчанию:

Refinement "Default Region"

{MaxElementSize = (2.0 2.0) MinElementSize = (0.5 0.5)

RefineFunction = MaxTransDiff(Variable = "DopingConcentration", Value = 3.0)}

Активная область:

Refinement "Active region"

{MaxElementSize = (0.5 0.5) MinElementSize = (0.1 0.1)

RefineFunction = MaxTransDiff(Variable = "DopingConcentration", Value = 1.0)}

Подзатворная область:

Refinement "Under gate"

{ MaxElementSize = (0.2 0.2) MinElementSize = (0.02 0.02)

RefineFunction = MaxTransDiff(Variable = "DopingConcentration", Value = 1.0)}

Канальная область и подзатворный окисел:

Refinement "Channel"

{MaxElementSize = (0.02 0.02) MinElementSize = (0.01 0.01)}

Обработываемая структура:

SubMesh "SubMesh_0"

{Geofile = "n@previous@_dio.grd"

Datafile = "n@previous@_dio.dat"}}

Задание геометрического положения областей:

Placements {

Refinement "Default Region"

{ Reference = "Default Region"}

Refinement "Active region"

{ Reference = "Active region"

*RefineWindow = rectangle [(-@<3.5+L_gate/2.0>@ 0.0),
(@<3.5+L_gate/2.0>@ 3.0)]}*

Refinement "Under gate"

{ Reference = "Under gate"

*RefineWindow = rectangle[(-@<0.5+L_gate/2.0>@ 0.0),
(@<0.5+L_gate/2.0>@ 1.0)]}*

Refinement "Channel"

{ Reference = "Channel"

*RefineWindow = rectangle[(-@<0.06+L_gate/2.0>@ -0.04),
(@<0.06+L_gate/2.0>@ 0.04)]}*

Submesh "SubMesh_0"

{ Reference = "SubMesh_0"}}

Расчетная сетка до и после оптимизации показана на рисунках 17,18.

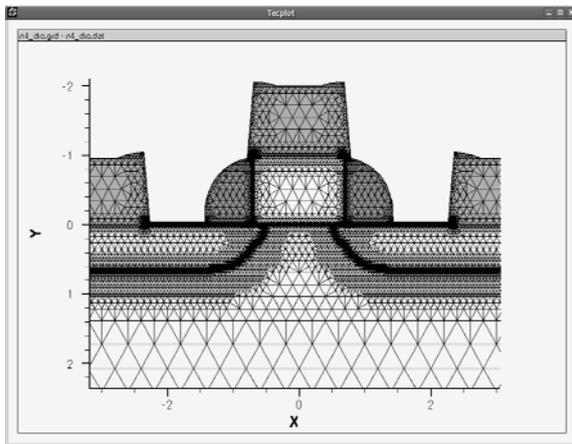


Рис. 17. Расчетная сетка, сгенерированная DIOS при физико-технологическом моделировании.

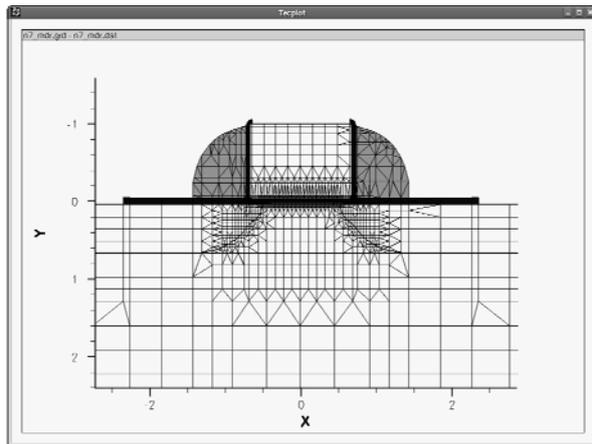


Рис. 18. Оптимизированная расчетная сетка, созданная программой MDRAW.

2.5. Расчет передаточной характеристики, определение порогового напряжения и крутизны характеристики n-МОП транзистора

Расчет передаточной характеристики производится в первом блоке DESSIS проекта n-МОП транзистора. При этом изменяется напряжение на затворе, остальные граничные условия фиксированы. Расчет производится путем решения уравнений Пуассона и непрерывности для электронов и дырок при изменяющихся граничных условиях.

Используемый для расчета командный файл:

* Задание входных и выходных файлов:

```
File { grid = "@grid@"
      doping = "@doping@"
      plot = "@dat@"
      current = "@plot@"
      output = "@log@" }
```

* Задание граничных условий на электродах:

```
Electrode { {name = "source" voltage = 0.0}
            {name = "gate" voltage = 0.0 }
            {name = "substrate" voltage = 0.0}
            {name = "drain" voltage = 0.0} }
```

* Используемые модели физических процессов:

```
Physics { AreaFactor = 1e3 }
```

```

EffectiveIntrinsicDensity(Slotboom)
Mobility(DopingDependence HighFieldSaturation(GradQuasiFermi)
NormalElectricField)
Recombination( SRH(DopingDependence ))
Temperature = 300}
* Концентрация зарядов на границе раздела оксид-кремний:
Physics(MaterialInterface="Oxide/Silicon") {charge(surfconc=1e11)}
* Математические методы решения:
Math {Extrapolate Iterations = 15 RelerrControl Derivatives
NewDiscretization}
* Рассчитываемые параметры:
Plot {AcceptorConcentration DonorConcentration DopingConcentration
TotalConcentration eDensity hDensity eMobility hMobility BuiltinPotential
ElectricField ElectrostaticPotential SpaceCharge SRHRecombination
TotalRecombination eCurrentDensity hCurrentDensity TotalCurrentDensity
eDriftVelocity hDriftVelocity eGradQuasiFermi/Vector
hGradQuasiFermi/Vector eQuasiFermiPotential hQuasiFermiPotential}
* Задание и решение системы уравнений:
Solve {
* Начальное решение:
Poisson
Coupled { Poisson Electron Hole }
* Подъем напряжения на стоке до необходимого уровня:
QuasiStationary (InitialStep = 0.5 MaxStep = 0.5 MinStep = 1e-3
Goal { name = "drain" voltage = 10 })
{ Coupled {Hole Electron Poisson}}
* Расчет передаточной характеристики при полученном напряжении на
стоке:
QuasiStationary (InitialStep = 0.05 MaxStep = 0.05 MinStep = 1e-7
Goal { name = "gate" voltage = 7 })
{Coupled {Hole Electron Poisson}}

```

Визуализация рассчитанной передаточной характеристики, а также определение по ней порогового напряжения и крутизны осуществляется с помощью программы INSPECT, работающей под управлением следующего командного файла:

```

#-----#
gr_setTitleAttr "IdVg"
#-----#
## Загрузка файлов с результатами расчета DESSIS:
set dset @plot@
set data [file rootname $dset]

```

```

proj_load $dset
## Построение передаточной характеристики:
cv_create IdVg "$data gate InnerVoltage" "$data drain TotalCurrent" y
## Визуализация передаточной характеристики:
cv_display IdVg y
## Задание параметров визуализации передаточной характеристики:
cv_setCurveAttr IdVg "IdVg" black solid 2 none 3 defcolor 1 defcolor
## Установка атрибутов координатных осей:
gr_setAxisAttr X {Gate Voltage (V)} 12 {} {} black 1 12 0 5 0
gr_setAxisAttr Y {Drain Current (A)} 12 {} {} black 1 12 0 5 0
## Определение порогового напряжения по касательной:
set VT [f_VT IdVg]
## Запись значения порогового напряжения в переменную GENESISe:
ft_scalar VT $VT
## Определение порогового напряжения по уровню тока стока 0.1 мкА:
set VT1 [f_VT1 IdVg]
ft_scalar VT1 $VT1
## Определение крутизны передаточной характеристики:
set S [f_gm IdVg]
ft_scalar S $S

```

Рассчитанная передаточная характеристика показана на рисунке 19.

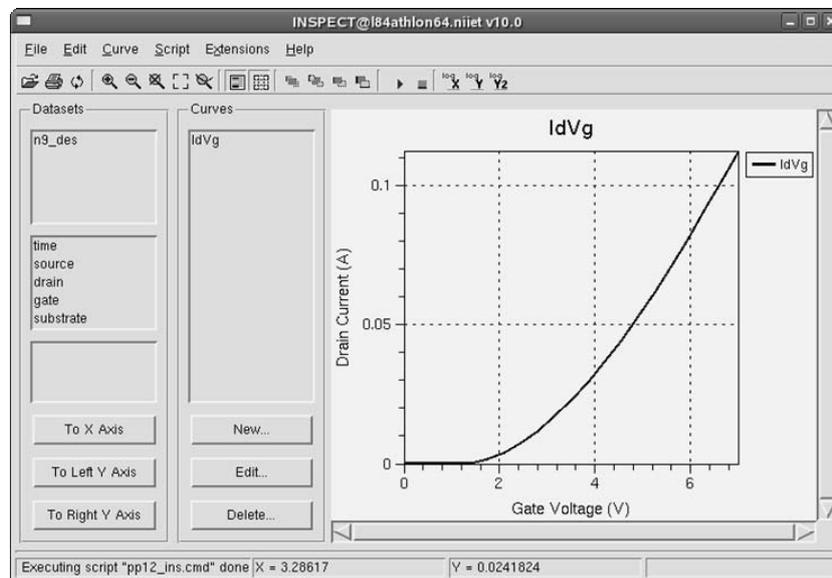


Рис. 19. Передаточная характеристика модели транзистора с длиной канала 3 мкм при напряжении сток-исток 10 В. Пороговое напряжение, определенное по касательной, составляет 3.4 В, по уровню тока стока 0.1 мкА: 0.8 В; крутизна характеристики 33 мА/В.

2.6. Расчет семейства выходных характеристик, определение сопротивления сток-исток в открытом состоянии в линейной области и в области насыщения

Расчет семейства выходных характеристик осуществляется во втором блоке DESSIS проекта n-МОП транзистора. При расчете изменяется напряжение на стоке при фиксированном смещении на затворе. Командный файл для расчета отличается от предыдущего командного файла DESSIS только секцией *Solve*{}. Ниже приведена секция *Solve*{ с необходимыми изменениями.

```
Solve {
  Poisson
  Coupled { Poisson Electron Hole}
  * Получение семейства напряжений на затворе с сохранением каждого
  * напряжения в отдельный файл vg1-vg5:
```

```
  QuasiStationary
    ( InitialStep = 0.5 Maxstep = 0.8 MinStep = 0.001
      Goal { name = "gate" voltage = 2 } )
    { coupled { Poisson Electron Hole}}
```

```
  save(FilePrefix = "vg1")
```

```
  QuasiStationary
    ( InitialStep = 0.5 Maxstep = 0.8 MinStep = 0.001
      Goal { name = "gate" voltage = 3 } )
    { coupled { Poisson Electron Hole}}
```

```
  save(FilePrefix = "vg2")
```

```
  QuasiStationary
    ( InitialStep = 0.5 Maxstep = 0.8 MinStep = 0.001
      Goal { name = "gate" voltage = 4 } )
    { coupled { Poisson Electron Hole}}
```

```
  save(FilePrefix = "vg3")
```

```
  QuasiStationary
    ( InitialStep = 0.5 Maxstep = 0.8 MinStep = 0.001
      Goal { name = "gate" voltage = 5 } )
    { coupled { Poisson Electron Hole}}
```

```
  save(FilePrefix = "vg4")
```

```
  QuasiStationary
    ( InitialStep = 0.5 Maxstep = 0.8 MinStep = 0.001
      Goal { name = "gate" voltage = 6 } )
    { coupled { Poisson Electron Hole}}
```

```
  save(FilePrefix="vg5")
```

```
  * Расчет стокowych характеристик для каждого из рассчитанных ранее
```

- * напряжений на затворе. Напряжения на затворе загружаются из
- * соответствующих файлов *vg1-vg5*, каждая рассчитанная стоковая
- * характеристика сохраняется в отдельный файл *Curve1-Curve5*:

```

load(FilePrefix = "vg1")
NewCurrent = "Curve1"
    QuasiStationary
        ( InitialStep = 0.001 Maxstep = 0.05 MinStep = 0.00001
          Goal { name = "drain" voltage = 10.0 } )
        { coupled { Poisson Electron Hole}}
load(FilePrefix = "vg2")
NewCurrent = "Curve2"
    QuasiStationary
        ( InitialStep = 0.001 Maxstep = 0.05 MinStep = 0.00001
          Goal { name = "drain" voltage = 10.0 } )
        { coupled { Poisson Electron Hole}}
load(FilePrefix = "vg3")
NewCurrent = "Curve3"
    QuasiStationary
        ( InitialStep = 0.001 Maxstep = 0.05 MinStep = 0.00001
          Goal { name = "drain" voltage = 10.0 } )
        { coupled { Poisson Electron Hole}}
load(FilePrefix = "vg4")
NewCurrent = "Curve4"
    QuasiStationary
        ( InitialStep = 0.001 Maxstep = 0.05 MinStep = 0.00001
          Goal { name = "drain" voltage = 10.0 } )
        { coupled { Poisson Electron Hole}}
load(FilePrefix = "vg5")
NewCurrent = "Curve5"
    QuasiStationary
        ( InitialStep = 0.001 Maxstep = 0.05 MinStep = 0.00001
          Goal { name = "drain" voltage = 10.0 } )
        { coupled { Poisson Electron Hole}}

```

Для визуального представления рассчитанного семейства выходных характеристик используется программа INSPECT, управляемая приведенным ниже командным файлом. По выходной характеристике модели n-МОП транзистора с максимальным напряжением на затворе определяется сопротивление сток-исток в открытом состоянии в линейной области, а также в области насыщения.

```

#### Загрузка файлов с расчетными данными DESSIS:
#setdep @node|-1@
proj_load Curve1n@node|-1@_des.plt
proj_load Curve2n@node|-1@_des.plt
proj_load Curve3n@node|-1@_des.plt
proj_load Curve4n@node|-1@_des.plt
proj_load Curve5n@node|-1@_des.plt
#### Построение выходных характеристик и отображение их:
cv_createDS idvd1 "Curve1n@node|-1@_des drain OuterVoltage"
"Curve1n@node|-1@_des drain TotalCurrent"
cv_createDS idvd2 "Curve2n@node|-1@_des drain OuterVoltage"
"Curve2n@node|-1@_des drain TotalCurrent"
cv_createDS idvd3 "Curve3n@node|-1@_des drain OuterVoltage"
"Curve3n@node|-1@_des drain TotalCurrent"
cv_createDS idvd4 "Curve4n@node|-1@_des drain OuterVoltage"
"Curve4n@node|-1@_des drain TotalCurrent"
cv_createDS idvd5 "Curve5n@node|-1@_des drain OuterVoltage"
"Curve5n@node|-1@_des drain TotalCurrent"
#### Задание атрибутов построенных кривых:
cv_setCurveAttr idvd1 "Vg=2 V" red solid 2 none 5 defcolor 1 defcolor
cv_setCurveAttr idvd2 "Vg=3 V" green solid 2 none 5 defcolor 1 defcolor
cv_setCurveAttr idvd3 "Vg=4 V" black solid 2 none 5 defcolor 1 defcolor
cv_setCurveAttr idvd4 "Vg=5 V" blue solid 2 none 5 defcolor 1 defcolor
cv_setCurveAttr idvd5 "Vg=6 V" magenta solid 2 none 5 defcolor 1 defcolor
#### Задание атрибутов координатных осей:
gr_setAxisAttr X {Drain Voltage (V)} 12 {} {} black 1 12 0 5 0
gr_setAxisAttr Y {Drain Current (A)} 12 {} {} black 1 12 0 5 0
#### Определение сопротивления сток-исток в области насыщения как
#### обратного значения производной от стоковой характеристики в
#### точке
#### максимума тока стока :
set Rout [cv_compute "vecvaly( 1/diff(<idvd5>), vecvalx(<idvd5>,
vecmax(<idvd5>)))" A A A A]
#### Запись рассчитанного сопротивления сток-исток в переменную
GENESISe:
ft_scalar Rout $Rout
#### Определение сопротивления сток-исток в линейной области (в точке
#### минимума
#### тока стока):
set Ron [cv_compute "vecvaly( 1/diff(<idvd5>), vecvalx(<idvd5>,
vecmin(<idvd5>)))" A A A A]
ft_scalar Ron $Ron

```

Семейство рассчитанных выходных характеристик приведено на рисунке 20.

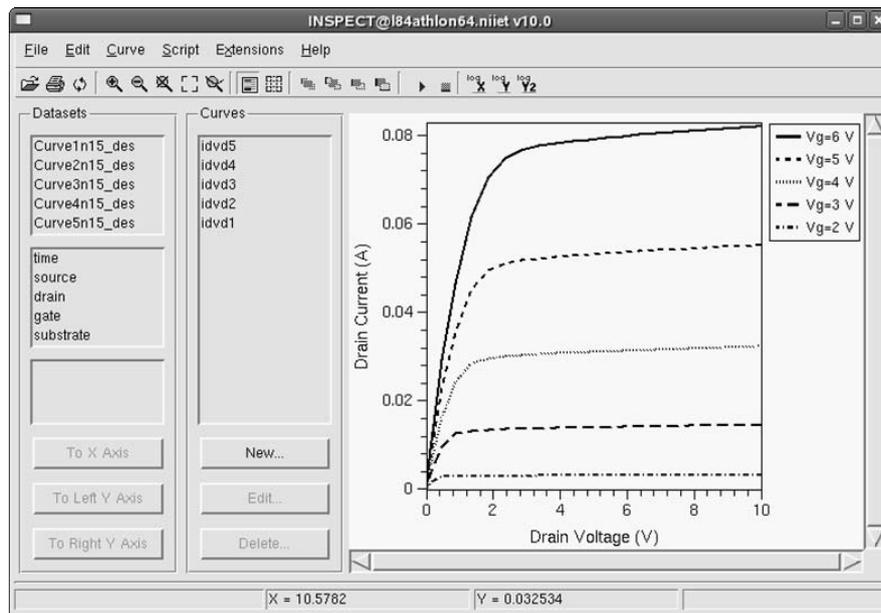


Рис. 20. Семейство выходных характеристик для модели n-МОП транзистора с длиной канала 3 мкм. Сопротивление сток-исток в открытом состоянии в линейной области 13.8 Ом, в области насыщения 2011 Ом.

2.7. Определение пробивного напряжения n-МОП транзистора

Определение пробивного напряжения методом построения ВАХ практически не отличается от расчета выходных характеристик. Необходимо только учесть лавинную генерацию носителей, а также повышать напряжение на стоке до уровня, при котором транзистор заведомо пробьется. Напряжение на затворе устанавливается равным 0 В. Ниже приведены необходимые изменения в командном файле DESSIS.

В секции *Electrode* добавляется резистор, подключенный к стоку:

```
Electrode {
  {name = "source"    voltage = 0.0}
  {name = "gate"     voltage = 0.0 }
  {name = "substrate" voltage = 0.0}
  {name = "drain"    voltage = 0.0 resistor=200}
}
```

В секции *Physics*{ } в блоке моделей генерационно-рекомбинационных процессов необходимо указать модель лавинной генерации. Дополнительно можно указать модели рекомбинации Оже и генерации путем туннельного перехода зона-зона:

```
Recombination(
  SRH(DopingDependence )
  Band2Band Auger Avalanche
)
```

В секции *Plot*{ } указывается запись распределения скорости лавинной генерации:

```
Plot{... AvalancheGeneration ...}
```

Необходимые изменения в секции *Solve*{ }:

```
Solve {
  Poisson
  Coupled { Poisson Electron Hole }
  QuasiStationary (
    InitialStep = 0.1 MaxStep = 0.1 MinStep = 1e-7
    Increment = 2 decrement = 4
    Goal { name = "drain" voltage = 20 })
  {Coupled {Hole Electron Poisson} }
```

В данном случае пробивное напряжение определяется как напряжение на стоке, при котором из-за быстрого увеличения тока стока уравнения перестают сходиться и расчет обрывается. Используемый для этого командный файл INSPECT:

```
#setdep @node|-1:all@
proj_load n@node|-1@_des.plt n@node|-1@_des
cv_createDS IdVd {n@node|-1@_des drain InnerVoltage} {n@node|-1@_des
drain TotalCurrent} y
cv_setCurveAttr IdVd "IdVd" black solid 1 none 5 defcolor 1 defcolor
#### Определение пробивного напряжения как напряжения на стоке,
#### при котором ток стока имеет максимальное значение:
set VBR [cv_compute "vecvalx(<IdVd>, vecmax(<IdVd>))" A A A A]
ft_scalar Vbr $VBR
```

Стоковая ВАХ при этом имеет вид, показанный на рисунке 21.

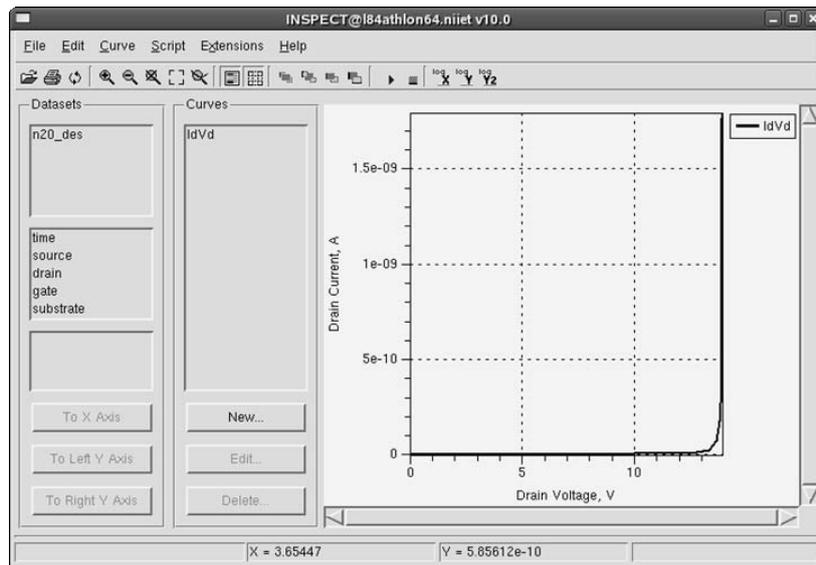


Рис. 21. Стоковая ВАХ модели n-МОП транзистора, рассчитанная с учетом лавинной генерации носителей. Пробой наступил при $U_{си} = 14$ В, при этом из-за резкого возрастания тока уравнения перестали сходиться и расчет в DESSIS прекратился. Напряжение на стоке осталось равным пробивному.

На рисунках 22 и 23 показаны распределения электростатического потенциала и напряженности электрического поля в модели n-МОП транзистора при напряжении на стоке, равном пробивному. Данные распределения позволяют определить область пробоя стокового p-n перехода, проконтролировать размеры обедненной области p-n перехода.

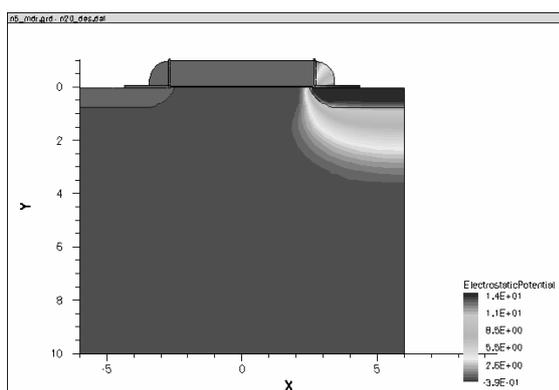


Рис. 22. Распределение электростатического потенциала в моделируемой структуре.

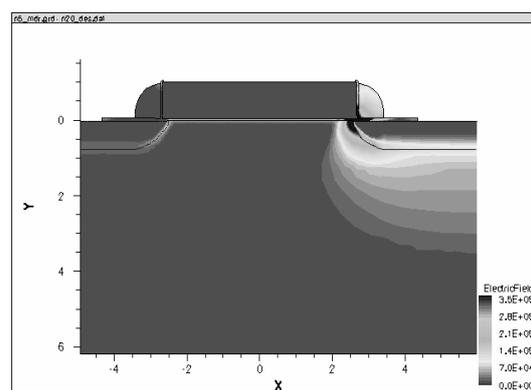


Рис. 23. Распределение напряженности электрического поля в моделируемой структуре.

Задания и вопросы

1. Зачем нужно легирование подложки бором в начале технологических операций в примере проекта n-МОП транзистора? Рассчитать передаточную характеристику транзистора без легирования подложки бором и сравнить с исходной передаточной характеристикой. Объяснить результат.
2. Как повлияет учет саморазогрева рассмотренного n-МОП транзистора на вид выходных характеристик? Рассчитать семейство выходных характеристик с учетом саморазогрева структуры. При этом в командном файле DESSIS необходимо добавить термический контакт (термод) на нижнюю поверхность подложки, а в секции Physics указать использование термодинамических уравнений и учесть зависимость скорости генерации от температуры. В секции Plot указать распределение температуры, и в секции Solve при изменяющемся напряжении на стоке дополнительно решить уравнения термодинамики. Определить наиболее горячие участки n-МОП транзистора.
3. Построить зависимости крутизны передаточной характеристики и сопротивления сток-исток в открытом состоянии от длины канала в диапазоне $10 \div 0.5$ мкм.

Литература

1. Королев М.А. Приборно-технологическое моделирование при разработке изделий микроэлектроники и микросистемной техники / М.А. Королев, Т.Ю. Крупкина, Ю.А. Чаплыгин // Известия вузов. Электроника. – 2005. – № 4-5. – С. 64–71.
2. Тихомиров П. Система Sentaurus TCAD компании Synopsys / П. Тихомиров, П. Пфеффли, М. Зорзи // Электроника: Наука. Технология. Бизнес. – 2006. – № 7. – С. 89–95.
3. Synopsys World Leader in EDA Software and Services. – (<http://www.synopsys.com/>)
4. ISE TCAD. Release 10. : User's manual. – Zurich, 2004. – 1058 p.
5. Тилл У. Интегральные схемы: материалы, приборы, изготовление / У. Тилл, Дж. Лаксон . – М. : Мир, 1985. – 504 с.

Учебное издание

**МОДЕЛИРОВАНИЕ
ПОЛЕВЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ
ПРИБОРОВ В САПР ISE TCAD**

Учебное пособие для вузов

Составители: **Ассесоров** Валерий Викторович
Быкадорова Галина Владимировна
Ткачев Александр Юрьевич

Редактор А.П. Воронина