

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

**ПРИБОРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ
ПРОЕКТИРОВАНИЕ
ПОЛЕВЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ
ПРИБОРОВ**

Учебно-методическое пособие

Составители:
А.В. Быстрицкий, Г.В. Быкадорова,
К.Г. Пономарев, А.Ю. Ткачёв

Воронеж
Издательский дом ВГУ
2017

Утверждено научно-методическим советом физического факультета 10 апреля 2017 г., протокол № 4

Рецензент – доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики твердого тела и наноструктур С. И. Курганский

Подготовлено на кафедре физики полупроводников и микроэлектроники физического факультета Воронежского государственного университета.

Рекомендовано для студентов 1-го и 2-го курсов очной формы обучения физического факультета, обучающихся по программам магистратуры.

Для направлений: 03.04.03 – Радиофизика; 11.04.04 – Электроника и наноэлектроника

СОДЕРЖАНИЕ

1. Физические основы работы МОП-транзисторов	4
2. Приборно-технологическое проектирование <i>n</i> -МОП-структур	15
2.1. Проект в программе-оболочке SENTAURUS Workbench	15
2.2. Технология создания <i>n</i> -МОП-структур	16
2.3. Физико-технологическая модель <i>n</i> -МОП-структуры в модуле SProcess	18
2.4. Оптимизация расчётной сетки в модуле SNMesh	23
2.5. Расчёт основных характеристик и параметров <i>n</i> -МОП-струк- туры в модулях SDevice и Inspect	26
2.5.1. Передаточная характеристика, пороговое напряжение и крутизна передаточной характеристики	26
2.5.2. Семейство выходных вольт-амперных характеристик, сопротивление сток-исток в открытом состоянии в линейной области и в области насыщения	29
2.5.3. Пробивное напряжение	32
Библиографический список	36

1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАБОТЫ МОП-ТРАНЗИСТОРОВ

МОП-транзисторы (*металл-окисел-полупроводник*) являются униполярными полупроводниковыми приборами, принцип действия которых основан на эффекте поля, т.е. изменении типа проводимости и концентрации носителей в приповерхностном слое полупроводника под действием внешнего управляющего электрического поля. МОП-транзистор состоит из подложки, двух сильнолегированных областей стока и истока с противоположным относительно подложки типом проводимости и затвора из сильнолегированного поликремния или металла, отделённого от подложки слоем тонкого $\sim (100 \div 500)$ нм подзатворного диэлектрика (рис. 1.1).

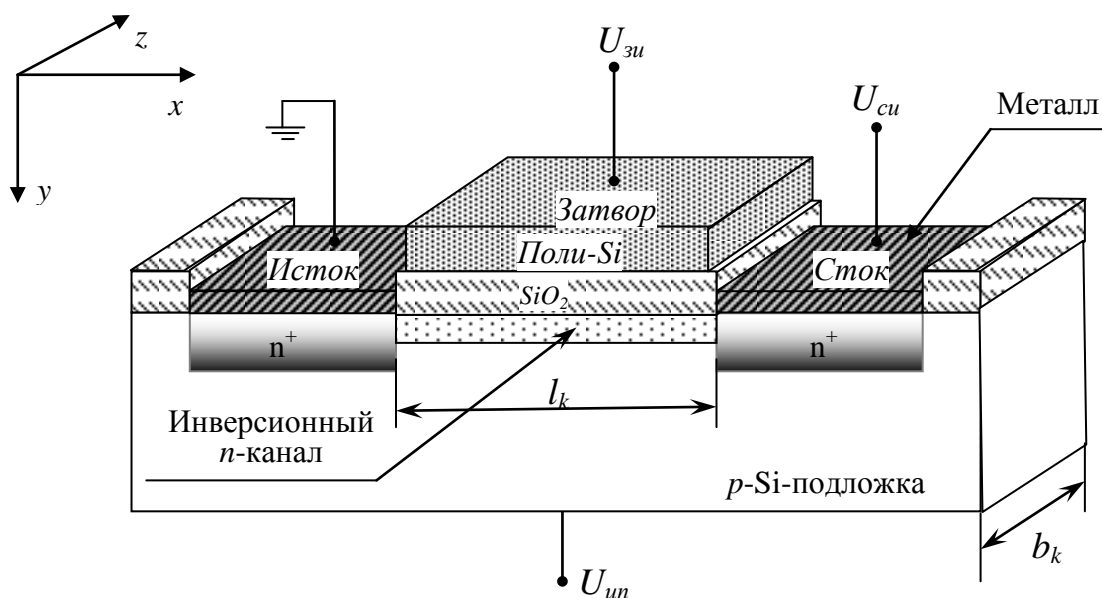


Рис. 1.1. Структура *n*-канального нормально закрытого МОП-транзистора

В нормальном состоянии, когда напряжение на затворе $U_{зи} = 0$, сопротивление сток-исток очень велико, поскольку в структуре находятся два встречно включённых *p-n*-перехода. При подаче на затвор *n*-канального нормально закрытого МОП-транзистора положительного относительно подложки напряжения дырки из приповерхностного подзатворного слоя кремния отталкиваются вглубь подложки электрическим полем, а электро-

ны из подложки, наоборот, притягиваются. В результате под затвором образуется обеднённая 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_{nop} , когда концентрации электронов и дырок в поверхностном слое сравниваются, происходит инверсия типа проводимости приповерхностного слоя полупроводника:

$$U_{nop} = 2\psi_B + \frac{\sqrt{\epsilon_s q N_A 2\psi_B}}{C_{ox}},$$

где ψ_s – электростатический потенциал начала сильной инверсии; ϵ_s – диэлектрическая постоянная кремния; q – заряд электрона; N_A – исходная концентрация носителей заряда подзатворной (канальной) области; C_{ox} – удельная ёмкость подзатворного диэлектрика.

В результате образуется канал n -типа, соединяющий n^+ -области стока и истока. 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.

Существуют p -МОП транзисторы обогащённого типа, а также p - и n -канальные транзисторы со встроенным каналом – это нормально открытые транзисторы, или транзисторы обеднённого типа. Встроенный канал формируется обычно при помощи ионного легирования. Структуры и основные характеристики транзисторов этих типов приведены в таблице 1.1.

На рисунке 1.2 схематично изображён n -канальный нормально закрытый МОП-транзистор с длиной канала $l_k \gg 1$ мкм, т. е. длинно канальный транзистор, исток которого соединён с подложкой и заземлён.

Структура и основные характеристики МОП-транзисторов

Тип	Структура	Общий вид вольт-амперных характеристик	
		передаточные	выходные
<i>n</i> -канальный нормально закрытый			
<i>p</i> -канальный нормально закрытый			
<i>n</i> -канальный нормально открытый			
<i>p</i> -канальный нормально открытый			

При напряжении на затворе больше порогового $U_{зи} > U_{пор}$ и нулевом напряжении сток-исток $U_{си} = 0$ канал имеет одинаковую толщину по всей длине (рис. 1.2а).

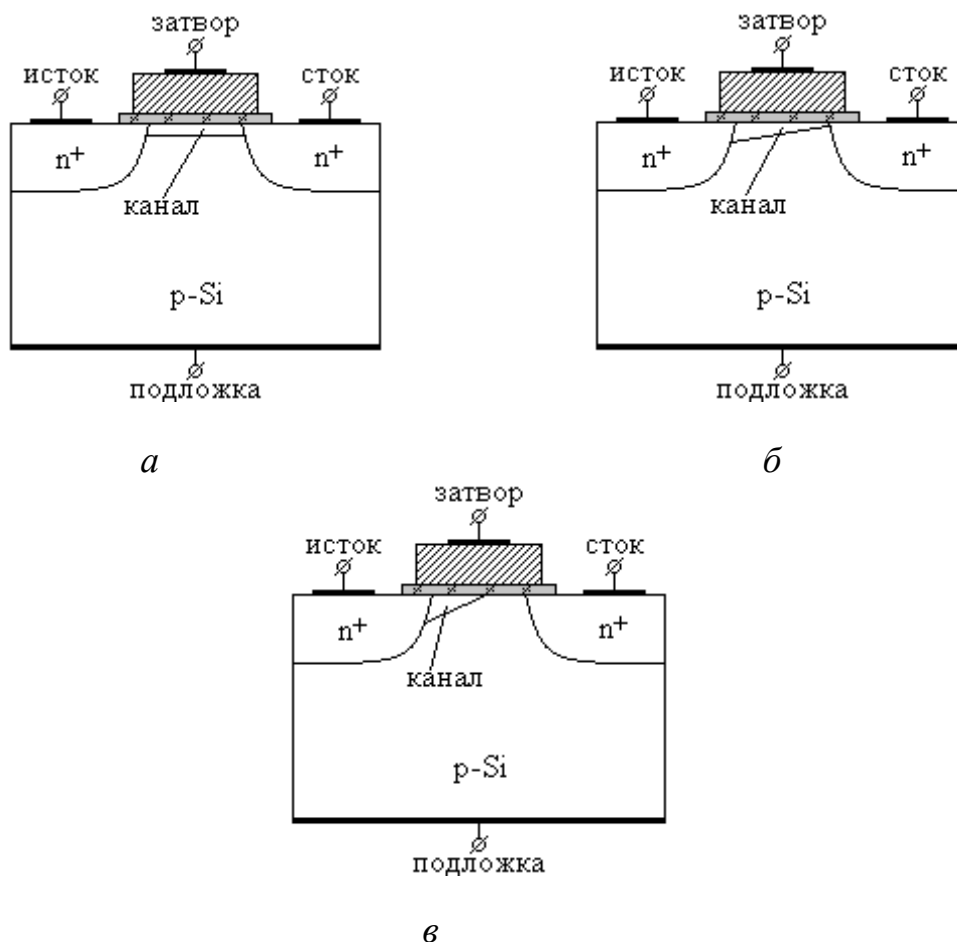


Рис. 1.2. Нормально закрытый n-канальный МОП-транзистор при:
 а – $U_{зи} > U_{пор}$ и $U_{си} = 0$; б – $U_{зи} > U_{пор}$ и $U_{си} > 0$;
 в – $U_{зи} > U_{пор}$ и $U_{си} > U_{насыщ}$

Если на сток подать положительное напряжение, то в цепи сток-исток потечёт ток $I_{си}$, величина которого регулируется затворным напряжением $U_{зи}$. 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, то толщина канала уменьшается по направлению к стоку (рис. 1.2б). При некотором $U_{си}$, называемым напряже-

нием отсечки $U_{отс}$, толщина канала у стока станет равной нулю, а при дальнейшем увеличении напряжения U_{cu} канал будет всё больше укорачиваться (рис. 1.2в). Ток I_{cu} при этом практически не увеличивается. Область рабочих параметров МОП-транзистора, в которой канал существует от истока до стока, является линейной областью, а область, в которой канал перекрыт, соответствует области насыщения, которая наступает при $U_{cu} > U_{насыщ}$.

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

$$\begin{aligned} \text{- в линейной области} \quad I_{cu} &= \frac{b_k}{l_k} \mu_n C_{ox} \left[(U_{zu} - U_{nop}) U_{cu} - \frac{1}{2} U_{cu}^2 \right]; \\ \text{- в области насыщения} \quad I_{cu} &= \frac{b_k}{l_k} \mu_n C_{ox} \frac{(U_{zu} - U_{nop})^2}{2}, \end{aligned}$$

где I_{cu} – ток стока; b_k – ширина канала; l_k – длина канала; μ_n – подвижность электронов в канале; C_{ox} – ёмкость МОП-структуры; U_{cu} – напряжение на стоке относительно истока; U_{zu} – напряжение на затворе относительно истока; U_{nop} – пороговое напряжение МОП-транзистора.

Передачная характеристика МОП-транзистора представляет собой зависимость тока стока от напряжения на затворе при фиксированном напряжении сток-исток. Типичный вид передаточных характеристик нормально закрытого n -МОП-транзистора приведён на рисунке 1.3а. 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. проведённой через точку перегиба) с осью напряжения на затворе.

Крутизна S определяется как тангенс угла наклона этой касательной:

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

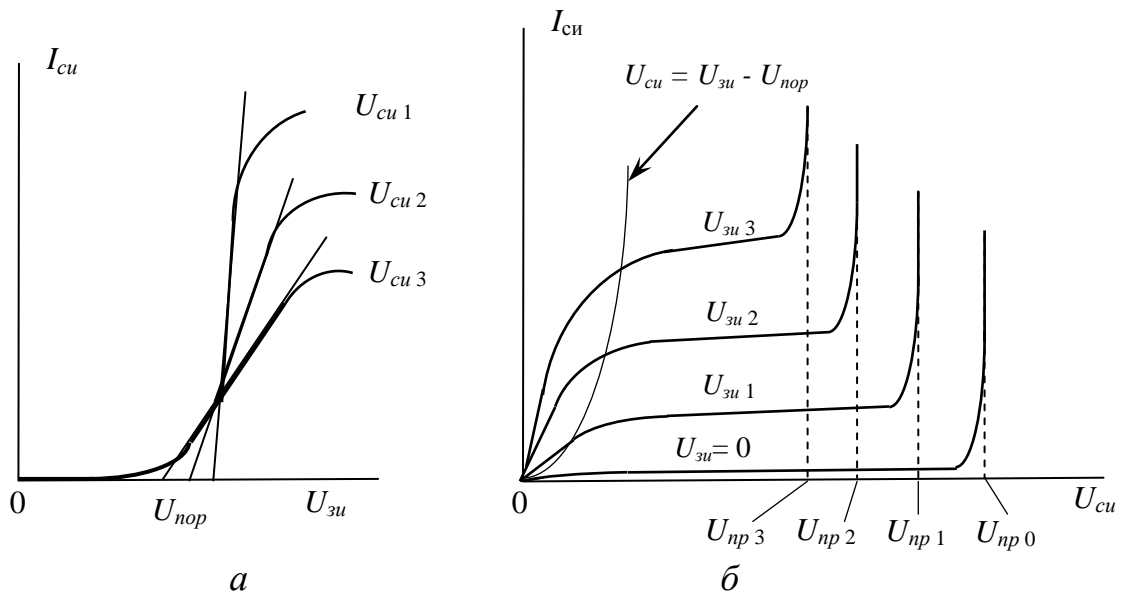


Рис. 1.3. Вольт-амперные характеристики нормально закрытого n-МОП-транзистора:

а – передаточные характеристики при различных напряжениях сток-исток $U_{cu1} > U_{cu2} > U_{cu3}$;

б – выходные стоковые характеристики при различных напряжениях на затворе $U_{zu1} > U_{zu2} > U_{zu3} > U_{nop}$

Выражение для крутизны можно записать в виде

$$S = \frac{b_k}{l_k} \mu_n C_{ox} U_{cu} .$$

Так как крутизна зависит от напряжения сток-исток, то пороговое напряжение, определённое таким способом, также зависит от напряжения сток-исток. Для того чтобы избавиться от зависимости порогового напряжения от напряжения сток-исток U_{cu} , целесообразно пороговое напряжение определять как напряжение, при котором ток стока достигает какого-либо определённого значения, например, 0,1 мкА.

Выходные вольт-амперные характеристики снимаются при фиксированном напряжении на затворе U_{zu} и представляют собой зависимость тока стока от напряжения сток-исток $I_{cu}(U_{cu})$. Типичные выходные характери-

стики нормально закрытого n -канального МОП-транзистора представлены на рисунке 1.3б. Перекрытие канала происходит при $U_{cu} = U_{zu} - U_{nop}$. Это парабола на рисунке 1.3б, 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 вольт-амперным характеристикам МОП-транзистора можно определить его сопротивление сток-исток R_{cu} в закрытом и открытом состоянии:

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

В закрытом состоянии МОП-транзистора сопротивление R_{cu} определяется при $U_{zu} = 0$ или при $U_{zu} = -U_{num}$, а в открытом состоянии R_{cu} МОП-транзистора определяется при напряжении на затворе, гарантирующем его полное открытие, обычно $U_{zu} = (3 \div 4)U_{nop}$. Сопротивление R_{cu} в открытом состоянии МОП-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 путём 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 на стоке пробивного напряжения U_{np} начинается лавинная генерация носителей заряда из-за ударной ионизации, т. е. происхо-

дит пробой стокового p - n -перехода, характеризуемый резким неконтролируемым увеличением тока стока (рис. 1.3б). При этом, в общем случае, коэффициенты ионизации $(\alpha_n, \alpha_p) \rightarrow \infty$. Критерием пробоя является равенство единице электронного J_n или дырочного J_p интеграла ионизации:

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

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

где x_j – толщина стокового p - n -перехода.

Используя данный критерий пробоя, можно определить напряжение пробоя U_{np} . Приблизительно напряжение пробоя можно определить по стоковой вольт-амперной характеристике (рис. 1.3б).

Для расчёта электрофизических параметров и характеристик полученных структур, рассматриваемых как самостоятельные приборы и функционирующих в различных режимах, задаётся и решается фундаментальная система уравнений, состоящая из уравнения Пуассона, стационарных уравнений непрерывности для электронов и дырок и выражений для электронного и дырочного токов с учётом дрейфовой и диффузионной компонент:

$$\begin{cases} \nabla(\varepsilon \nabla \psi) = -q(p - n + N_D^+ - N_A^-) \\ \nabla \vec{J}_n = q(R - G) \\ -\nabla \vec{J}_p = q(R - G) \\ \vec{J}_n = -q(\mu_n n \nabla \psi - D_n \nabla n) \\ \vec{J}_p = -q(\mu_p p \nabla \psi + D_p \nabla p) \end{cases},$$

где ε – диэлектрическая проницаемость; ψ – электростатический потенциал; q – заряд электрона; p – концентрация дырок; n – концентрация электронов; N_D^+ – концентрация ионизированных атомов доноров; N_A^- – концентрация ионизированных атомов акцепторов; J_n – плотность электронного тока;

J_p – плотность дырочного тока; R – скорость рекомбинации электронов и дырок; G – скорость генерации электронов и дырок; μ_n, μ_p – подвижности электронов и дырок соответственно; D_n, D_p – коэффициенты диффузии электронов и дырок соответственно. Вид J_n и J_p зависит от используемых транспортных моделей.

При численном решении уравнения Пуассона потенциал и концентрация заряда заменяются дискретными величинами в узлах разностной сетки в области решения. Такое представление достигается дискретизацией уравнения Пуассона, приводящей к системе нелинейных алгебраических уравнений. Каждому узлу сетки соответствует одно уравнение, за исключением тех узлов, в которых потенциал задаётся граничными условиями.

Одним из методов численного решения системы нелинейных уравнений является метод Ньютона, который основан на разложении нелинейных членов уравнений в ряд Тейлора до членов первого порядка в окрестности последнего приближения для электростатического потенциала ψ .

Итерационная процедура решения системы нелинейных алгебраических уравнений повторяется до тех пор, пока решения, полученные на двух последовательных итерациях, не будут удовлетворять условию $n+1$ итерации

$$\left| \frac{\psi_k^{n+1} - \psi_k^n}{\psi_k^{n+1}} \right| < \delta, \quad k = 1, \dots, N,$$

где δ - предельное значение ошибки.

При расчёте электрофизических параметров необходимо корректно выбирать соответствующие модели физических процессов, происходящих в активных областях исследуемых структур.

Для эффективной собственной концентрации носителей может быть учтена зависимость ширины запрещённой зоны от концентрации примесей, которая описывается уравнением

$$\Delta E_g = E_{bgn} \left[\ln \left(\frac{N}{N_{ref}} \right) + \sqrt{\left(\ln \left(\frac{N}{N_{ref}} \right) \right)^2 + 0,5} \right],$$

где ΔE_g – ширина запрещённой зоны полупроводника; E_{bgn} и N_{ref} – параметры полупроводника; $N = N_A + N_D$ – полная концентрация примесей.

При высокой напряжённости электрического поля в модели подвижности носителей учитывается насыщение дрейфовой скорости носителей

$$\mu(E) = \frac{\mu_{low}}{\left[1 + \left(\frac{\mu_{low} E}{v_{sat}} \right)^\beta \right]^{\frac{1}{\beta}}},$$

где $\mu(E)$ – подвижность носителей; μ_{low} – подвижность носителей при низкой напряжённости электрического поля; E – напряжённость внутреннего электрического поля, равная градиенту квазиуровня Ферми $\varphi_{quasifermi}$: $E = |\nabla \varphi_{quasifermi}|$; v_{sat} – дрейфовая скорость носителей в области насыщения; β – коэффициент, учитывающий температурную зависимость подвижности.

Дрейфовая скорость носителей в области насыщения и коэффициент β зависят от температуры:

$$v_{sat} = v_{sat,0} \left(\frac{T_0}{T} \right)^{v_{sat,exp}}; \quad \beta = \beta_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\beta_{exp}},$$

где $v_{sat,0}$, $v_{sat,exp}$, β_0 , β_{exp} – параметры полупроводника; $T_0 = 300$ К; T – температура полупроводника.

Зависимость подвижности носителей от концентрации примесей может быть описана в рамках модели Masetti:

$$\mu = \mu_{min1} \cdot \exp \left(-\frac{P_c}{N} \right) + \frac{\mu_{const} - \mu_{min2}}{1 + \left(\frac{N}{C_r} \right)^\alpha} - \frac{\mu_1}{1 + \left(\frac{C_s}{N} \right)^\beta},$$

где μ_{min1} , μ_{min2} , P_c , μ_{const} , μ_1 , C_r , C_s – эмпирические параметры модели для заданного полупроводника.

Для генерационно-рекомбинационных процессов используется модель Шокли–Рида–Холла (ШРХ):

$$R - G = \frac{np - n_{i,eff}^2}{\tau_p(n + n_1) + \tau_n(p + p_1)};$$

$$n_1 = n_{i,eff} \cdot \exp\left(\frac{E_i - E_t}{kT}\right); \quad p_1 = n_{i,eff} \cdot \exp\left(\frac{E_t - E_i}{kT}\right),$$

где $n_{i,eff}$ – эффективная собственная концентрация носителей; τ_n , τ_p – времена жизни неосновных носителей в сильнолегированных областях; n_1 , p_1 – концентрации носителей, при которых уровень Ферми совпадает с дефектным уровнем E_t ; E_i – уровень энергии в середине запрещённой зоны.

При расчёте термодинамических свойств моделируемых структур необходимо учитывать рассеяние мощности при протекании тока в активных областях, что приводит к повышению температуры и перераспределению её в структуре кристалла. Температурные поля T при наличии тепловых источников мощности Q описываются уравнением теплопроводности

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k \nabla T) + Q,$$

где ρ – удельная плотность материала; c – удельная теплоемкость материала; k – коэффициент теплопроводности. При этом учитываются такие эффекты, как зависимости подвижности носителей и скоростей генерационно-рекомбинационных процессов от температуры, эффект Томсона и др.

2. ПРИБОРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ *n*-МОП-СТРУКТУР

2.1. Проект в программе-оболочке **SENTAURUS Workbench**

В данной работе рассматриваются основные принципы моделирования *n*-МОП-структур и методы получения их электрофизических параметров. Длина канала *n*-МОП-структур варьируется от 3 мкм до 6 мкм. Проект составлен в интерактивной графической оболочке **SENTAURUS Workbench (SWB)** (рис. 2.1). Проект выполняет физико-технологическое моделирование в модуле **SProcess**, оптимизацию расчётной сетки программными средствами модуля **SNMesh**, получение выходных и передаточных характеристик, крутизны, пробивного напряжения, сопротивления сток-исток в открытом состоянии в линейной области и в области насыщения, расчёт и графическое представление которых осуществляется в модулях **SDevice** и **Inspect**.

/DBserv4/tcad.work/Ponomarev/NMOS (Standard Configuration) - SWB@lynx.edc.local vH-2013.03															
ool Parameter Experiments Nodes Variables PCM Studio Extensions Help															
Scenario: all															
Project Scheduler															
	L_gate									VT	VT1	S	Rout	Ron	Vbr
1	3	--	--	--	--	--	--	--	--	3.0705	0.4935	0.0458	1109.2160	9.7138	12.8431
2	4	--	--	--	--	--	--	--	--	3.4192	0.6193	0.0322	2687.8251	17.2628	13.0185
3	5	--	--	--	--	--	--	--	--	3.4164	0.6192	0.0321	2697.8134	17.3130	12.7581
4	6	--	--	--	--	--	--	--	--	3.5450	0.6326	0.0247	4579.3890	24.8403	12.6781

*Рис. 2.1. Проект в SENTAURUS Workbench для формирования и расчёта параметров *n*-МОП-структуры*

Первым модулем проекта является **SProcess**, который моделирует технологический процесс формирования двумерной структуры полупроводникового прибора. Следующим добавляется модуль **SNMesh**, который позволяет настроить расчётную сетку таким образом, чтобы обеспечить требуемую точность решения фундаментальной системы уравнений в модуле

SDevice. Отправной точкой для модуля **SNMesh** являются файлы с динамически настроенной сеткой и граничными условиями моделируемой области, полученные в результате работы модуля **SProcess**. Далее добавляются три связки из модулей **SDevice** и **Inspect**, в которых рассчитываются исследуемые параметры *n*-МОП-структуры и, соответственно, получаются искомые зависимости в графическом редакторе.

2.2. Технология создания *n*-МОП-структур

В данной работе рассмотрен пример планарной технологии изготовления нормально закрытого *n*-МОП-транзистора, формирование которого в модуле **SProcess** реализуется с помощью заданной последовательности технологических операций.

1. Исходная кремниевая подложка с ориентацией (100) легирована бором с концентрацией $1,0 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$.
2. Нормальная ионная имплантация бора с энергией 20 кэВ и дозой $3,0 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ для корректировки порогового напряжения.
3. Диффузионная разгонка в сухом кислороде при температуре 1100 °С имплантированного бора с одновременным наращиваем тонкого слоя подзатворного диэлектрика.
4. Осаждение поликремния толщиной 1 мкм для последующего создания затвора (рис. 2.2).
5. Нанесение фоторезистивной маски для формирования затвора при помощи фотолитографии.
6. Анизотропное травление поликремния и далее стравливание фоторезиста.
7. Окисление поликремния при температуре 1100 °С в течение 15 минут в сухом кислороде.

8. Нормальная ионная имплантация фосфорной примеси *n*-типа с энергией 50 кэВ и дозой 100 мкКл/см² поликремния, стоковой и истоковой областей (рис. 2.3).
9. Осаждение нитрида кремния для последующего формирования спейсеров (рис. 2.4).
10. Формирование спейсеров анизотропным травлением нитрида кремния.
11. Нормальная ионная имплантация фосфорной примеси *n*-типа с энергией 50 кэВ и дозой 1000 мкКл/см² поликремния, стоковой и истоковой областей (рис. 2.5).
12. Диффузионная разгонка фосфорной примеси в атмосфере сухого кислорода при температуре 1000 °С в течение 3 минут.
13. Нанесение фоторезистивной маски для формирования контактных окон.
14. Вскрытие контактных окон и удаление фоторезиста (рис. 2.6).
15. Формирование алюминиевых контактов (рис. 2.7).

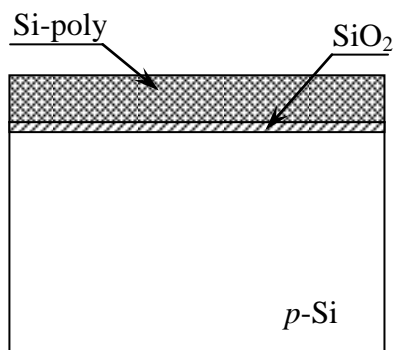


Рис. 2.2. Структура с тонким подзатворным окислом и осаждённым поликремнием

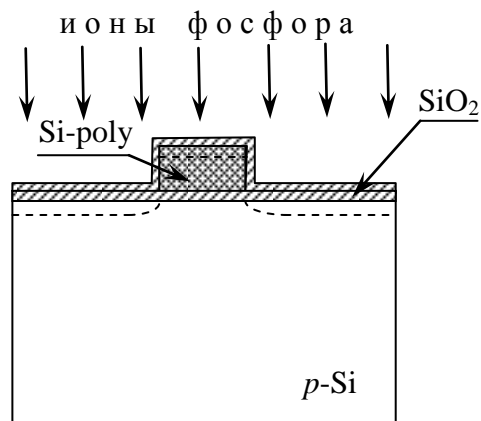


Рис. 2.3. Формирование поликремниевого затвора, окисление структуры и имплантация фосфора

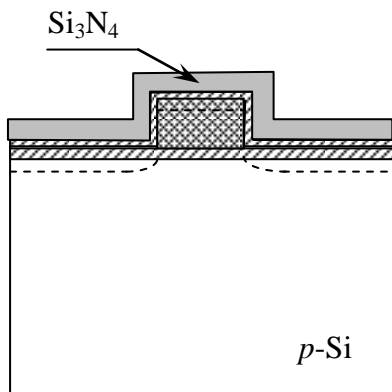


Рис. 2.4. Осаждение нитрида кремния

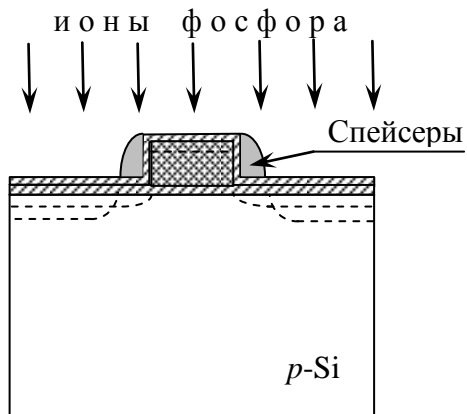


Рис. 2.5. Формирование нитридных спейсеров и имплантация фосфора

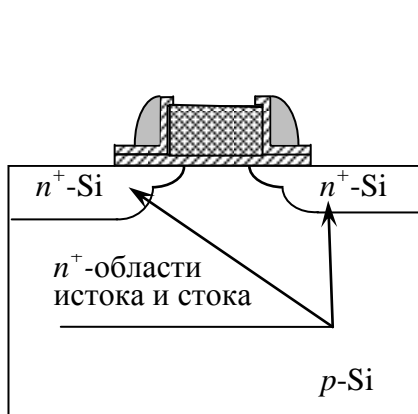


Рис. 2.6. Диффузионная разгонка фосфорной примеси и вскрытие контактных окон

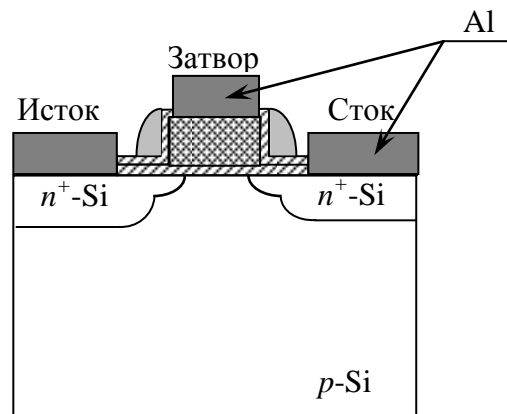


Рис. 2.7. Готовая структура со сформированными алюминиевыми контактами

2.3. Физико-технологическая модель n -МОП-структуры в модуле SProcess

Для создания физико-технологической модели n -МОП-транзистора используется командный файл для модуля **SProcess** (листинг 2.1). Топологический размер длины канала рассчитывается через параметр `@L_gate@`, который задаётся в **SENTAURUS Workbench**.

```

#-----#
# <<n-MOS>> #
#-----#
# Графическое отображение построения структуры в интерактивном режиме:
graphics off

# Для отображения необходимо, чтобы в свойствах модуля SProcess был
# выставлен интерактивный режим.

# Адаптация расчётной сетки:
pdbSet Grid Adaptive 1

# Определение параметров моделей диффузии и ионной имплантации:
pdbSet Silicon Dopant DiffModel Pair
implant tables=Default
implant species= Phosphorus Silicon gaussian

# Создание половины симметричной структуры.
# Задание геометрии кремниевой подложки:
line x location=0 spacing=100 tag=Top
line x location=4 spacing=100 tag=Bottom
line y location=0 spacing=100 tag=Left
line y location=3.5+@L_gate@/2 spacing=100 tag=Right

# Определение моделируемой области:
region Silicon xlo = Top xhi = Bottom ylo = Left yhi = Right

# Свойства кремниевой подложки:
init field=Boron concentration = 1e+15 wafer.orient=100

# Ионная имплантация бора:
implant Boron energy = 20 dose = 3e+12 tilt = 0

# Диффузионная разгонка бора с формированием подзатворного окисла:
diffuse temperature = 1100 time = 10 O2

# Осаждение поликремния:
deposit PolySilicon thickness = 1000<nm>

# Фоторезистивная маска для травления поликремния:
mask name = gate_mask segments = {0 0.2+@L_gate@/2} negative
photo mask = gate_mask thickness = 1000<nm>

```

```

# Анизотропное травление незакрытой области поликремния
# (формирование затвора):
etch PolySilicon etchstop = Oxide type = anisotropic rate = 100

# Удаление фоторезиста:
strip Photoresist

# Окисление поликремния:
diffuse temperature = 1100 time = 15 O2

# Ионное легирование фосфором поликремния, совмещение истока и
# затвора:
implant Phosphorus dose = 100/1.6e-13 energy = 50 tilt = 0

# Осаждение нитрида кремния:
deposit Nitride thickness = 700<nm>

# Формирования нитридного спейсера путем анизотропного травления:
etch Nitride etchstop = Oxide rate = 100 type = anisotropic \
etchstop.overetch = 0.1

# Ионная имплантация фосфора:
implant Phosphorus dose = 1000/1.6e-13 energy = 50 tilt = 0

# Диффузионная разгонка фосфора:
diffuse temperature = 1000 time = 3 O2

# Фоторезистивная маска для создания контактных окон:
mask name = c_windows segments = {0.15+@L_gate@/2 1.85+@L_gate@/2} \
negative
photo mask = c_windows thickness = 1000<nm>

# Травление оксида кремния:
etch Oxide thickness = 200<nm> rate = 100 type = anisotropic

# Удаление фоторезиста:
strip Photoresist

# Осаждение алюминия:
deposit Aluminum thickness = 1000<nm>

# Фоторезистивная маска для создания алюминиевых контактов:
mask name = contact0 segments = {0 0.35+@L_gate@/2} negative
photo mask = contact0 thickness = 1000<nm>
mask name = contact1 segments = {1.7+@L_gate@/2 3.5+@L_gate@/2} \

```

```

negative
photo mask = contact1 thickness = 1000<nm>

# Травление алюминия:
etch Aluminum thickness = 1600<nm> type = anisotropic rate = 100

# Удаление фоторезиста:
strip Photoresist

# Зеркальное отображение относительно оси X:
transform reflect left

# Обозначение контактов для дальнейшей работы в SDevice:
contact box xlo = -2.2 xhi = -0.8 ylo = -(0.5+@L_gate@/2) \
yhi = 0.5+@L_gate@/2 name = "gate" Aluminum
contact box xlo = -1.2 xhi = 0.2 ylo = -(3.5+@L_gate@/2) \
yhi = -(1.5+@L_gate@/2) name = "source" Aluminum
contact box xlo = -1.2 xhi = 0.2 ylo = 1.5+@L_gate@/2 \
yhi = 3.5+@L_gate@/2 name = "drain" Aluminum
contact bottom Silicon name = "substrate"

# Сохранение структуры:
struct smesh=n@node@

# Получение профилей распределения примесей:
SetPlxList { NetActive }
WritePlx n@node@_y y = 0
WritePlx n@node@_x x = 0.05

```

В результате моделирования формируется физико-технологическая модель *n*-МОП-структуры (рис. 2.8), а также строятся графики профилей распределения примесей в приповерхностном слое (рис. 2.9) и в вертикальном сечении, проходящем через середину структуры (рис. 2.10).

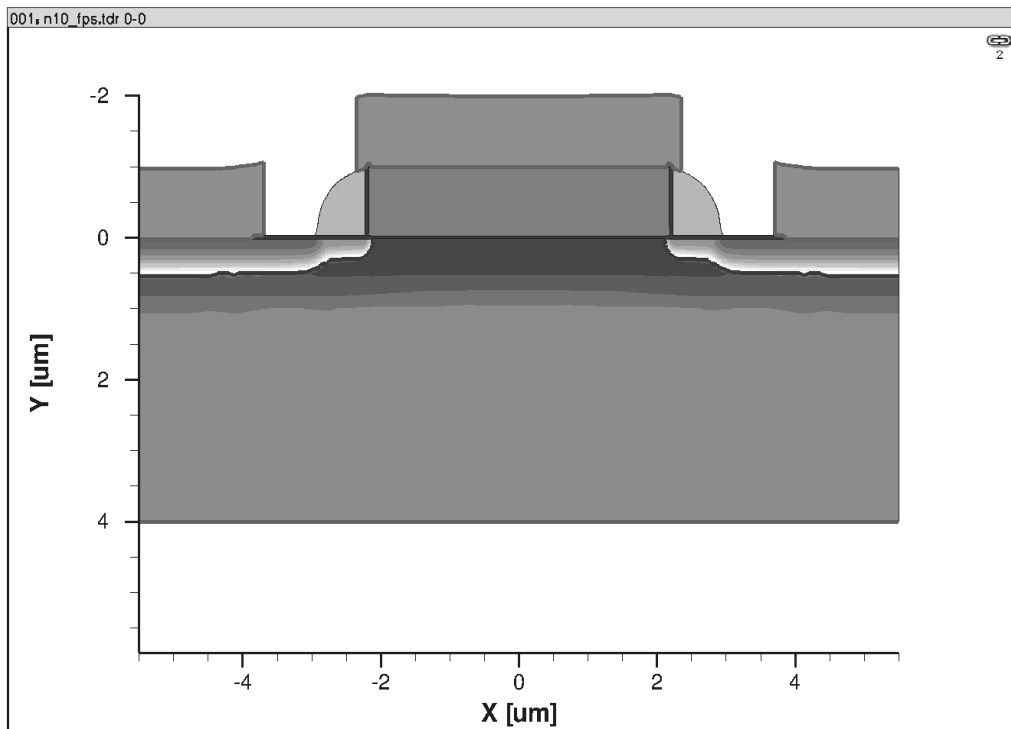


Рис. 2.8. Физико-технологическая модель n-МОП-структуры с длиной канала 4 мкм

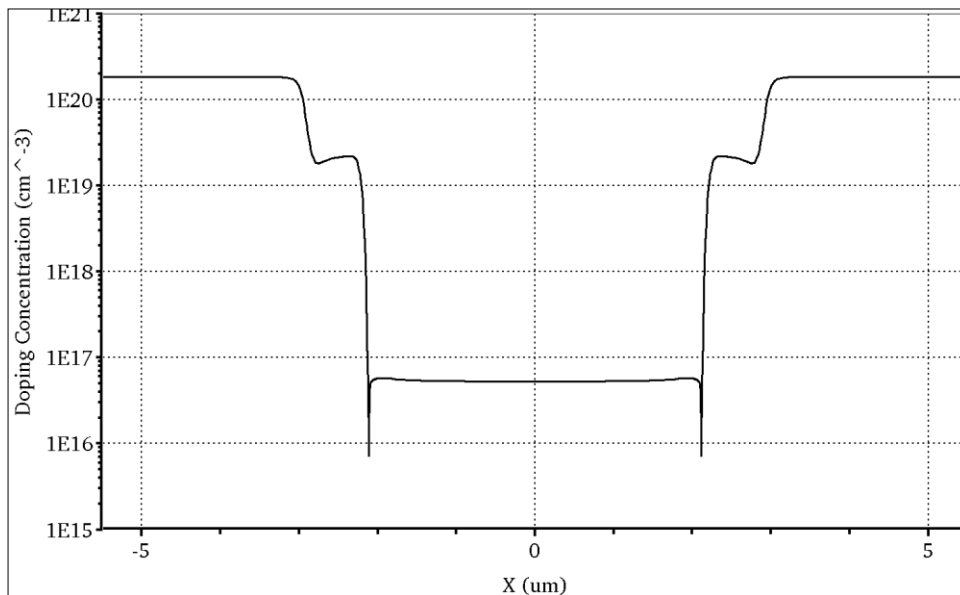


Рис. 2.9. Распределение концентрации примесей в приповерхностном слое n-МОП-структуры с длиной канала 4 мкм

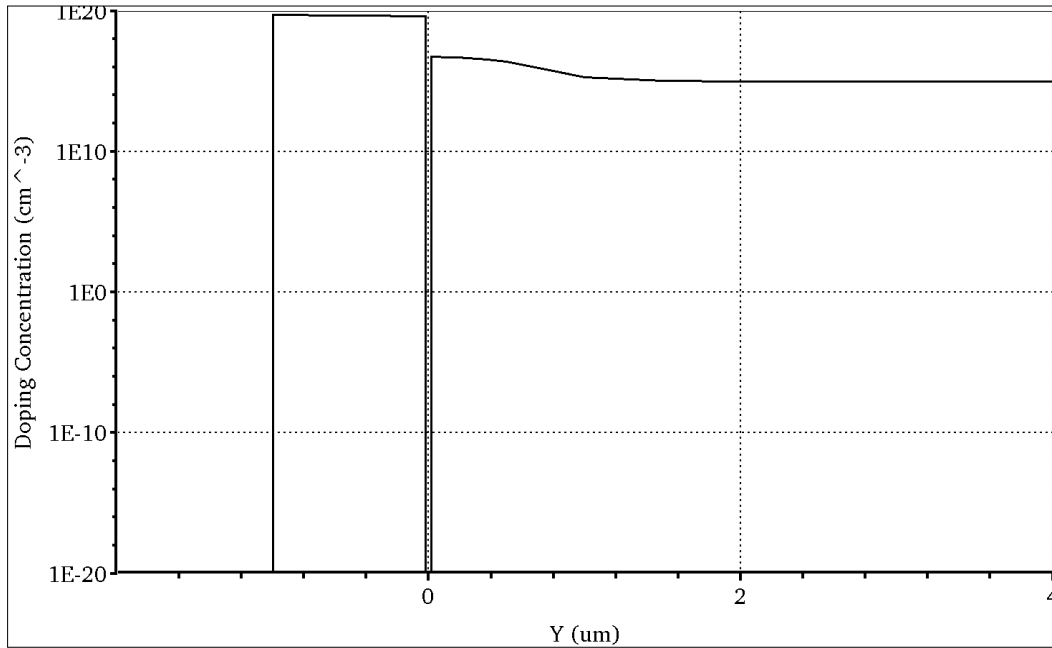


Рис. 2.10. Концентрационный профиль в вертикальном сечении, проходящем через середину структуры

2.4. Оптимизация расчётной сетки в модуле SNMesh

Для оптимизации расчётной сетки физико-технологической модели *n*-МОП-транзистора используется модуль **SNMesh** с командным файлом, приведённым в листинге 2.2.

Листинг 2.2

```
# Задание областей, в которых будет изменена расчётная сетка:
Definitions {
# Обозначение полной структуры:
Refinement "Default Region"
{ MaxElementSize = (4.0 4.0) MinElementSize = (1.0 1.0)
  RefineFunction = MaxTransDiff(Variable = "DopingConcentration", Value = 3.0) }

# Обозначение активной области:
Refinement "Active region"
{ MaxElementSize = (0.5 0.5) MinElementSize = (0.1 0.1)
  RefineFunction = MaxTransDiff(Variable = "DopingConcentration", Value = 1.0) }
```

```

# Обозначение подзатворной области:
Refinement "Under gate"
{ MaxElementSize = (0.2 0.2) MinElementSize = (0.02 0.02)
  RefineFunction = MaxTransDiff(Variable = "DopingConcentration", Value = 1.0) }

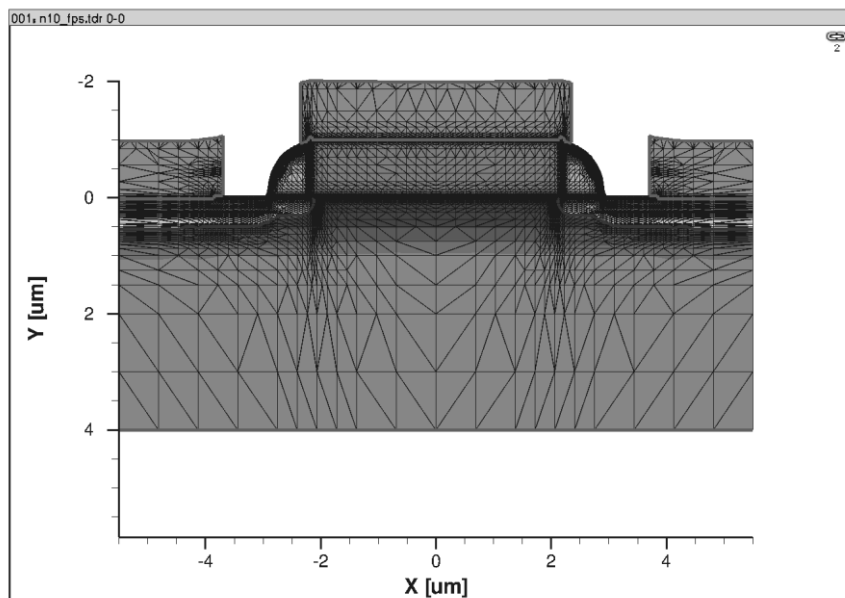
# Обозначение канальной области с подзатворным диэлектриком:
Refinement "Channel"
{ MaxElementSize = (0.02 0.02) MinElementSize = (0.01 0.01) }

# Указание обрабатываемой структуры:
SubMesh "SubMesh_0"
{ Geofile = "n@previous@_fps.tdr"
  Datafile = "n@previous@_fps.dat" } }

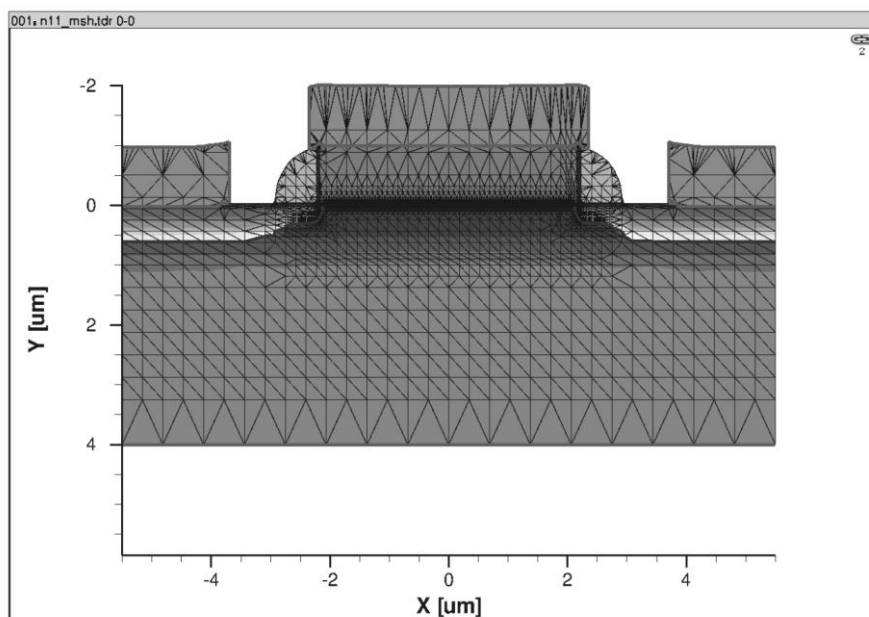
# Определение геометрического положения областей:
Placements {
  Refinement "Default Region"
  { Reference = "Default Region" }
  Refinement "Active region"
  { Reference = "Active region"
    RefineWindow=rectangle [(-@<3.5+L_gate/2.0>@ 0.0), (@<3.5+L_gate/2.0>@ 3.0)] }
  Refinement "Under gate"
  { 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" } }

```

В результате расчётная сетка, сгенерированная в модуле **SProcess** при физико-технологическом моделировании (рис. 2.11), оптимизирована с помощью программного модуля **SNMesh** (рис. 2.12).



*Рис. 2.11. Расчётная сетка, сгенерированная в модуле **SProcess** при физико-технологическом моделировании*



*Рис. 2.12. Оптимизированная расчётная сетка, созданная в модуле **SNMesh***

2.5. Расчёт основных характеристик и параметров *n*-МОП-структуры в модулях SDevice и Inspect

2.5.1. Передаточная характеристика, пороговое напряжение и крутизна передаточной характеристики

Передаточная характеристика рассчитывается с помощью командного файла модуля **SDevice** (листинг 2.3). Варьируется только напряжение на затворе, другие граничные условия имеют постоянные значения. Расчёт производится путем решения уравнений Пуассона и непрерывности для электронов и дырок при изменяющихся граничных условиях.

Листинг 2.3

* *Определение входных и выходных файлов:*

```
File { grid = "@tdr@"  
      current = "@plot@"  
      output = «@log@»  
      plot = «@dat@» }
```

* *Граничные условия на электродах:*

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

* *Модели физических процессов:*

```
Physics { AreaFactor = 1e3 EffectiveIntrinsicDensity(Slotboom)  
          Mobility(DopingDependence HighFieldSaturation(GradQuasiFermi)  
                NormalElectricField)  
          Recombination(SRH(DopingDependence )) Temperature = 300 }
```

* *Задание поверхностной плотности зарядов на границе оксид-кремний:*

```
Physics(MaterialInterface="Oxide/Silicon") {charge(surfconc=1e11)}
```

* *Методы математического решения:*

```
Math { Extrapolate Iterations = 15 RelerrControl Derivatives }
```

* *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 }

```

** Решение системы уравнений:*

```

Solve {
Poisson Coupled { Poisson Electron Hole }

```

** Поднятие напряжения на стоке:*

```

QuasiStationary (InitialStep = 0.5 MaxStep = 0.5 MinStep = 1e-3
                  Goal { name = "drain" voltage = 10 })
{ Coupled { Hole Electron Poisson } }

```

** Получение передаточной вольт-амперной характеристики:*

```

QuasiStationary (InitialStep = 0.05 MaxStep = 0.05 MinStep = 1e-7
                  Goal { name = "gate" voltage = 7 })
{ Coupled { Hole Electron Poisson } } }

```

Визуализация рассчитанной передаточной вольт-амперной характеристики и определение по ней крутизны и порогового напряжения выполняется с помощью командного файла модуля **Inspect** (листинг 2.4).

Листинг 2.4

```

gr_setTitleAttr "IdVg"

# Получение данных с результатами из SDevice:
set dset @plot@
set data [file rootname $dset]
proj_load $dset

# Построение передаточной вольт-амперной характеристики:
cv_create IdVg "$data gate InnerVoltage" "$data drain TotalCurrent" y

# Визуализация:
cv_display IdVg y

# Параметры визуализации:
cv_setCurveAttr IdVg "IdVg" black solid 2 none 3 defcolor 1 defcolor

# Задание атрибутов осей координат:
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 ]
```

```
ft_scalar VT $VT
```

Определение порогового напряжения по уровню тока стока 0,1 мкА:

```
set VT1 [ f_VT1 IdVg ]
```

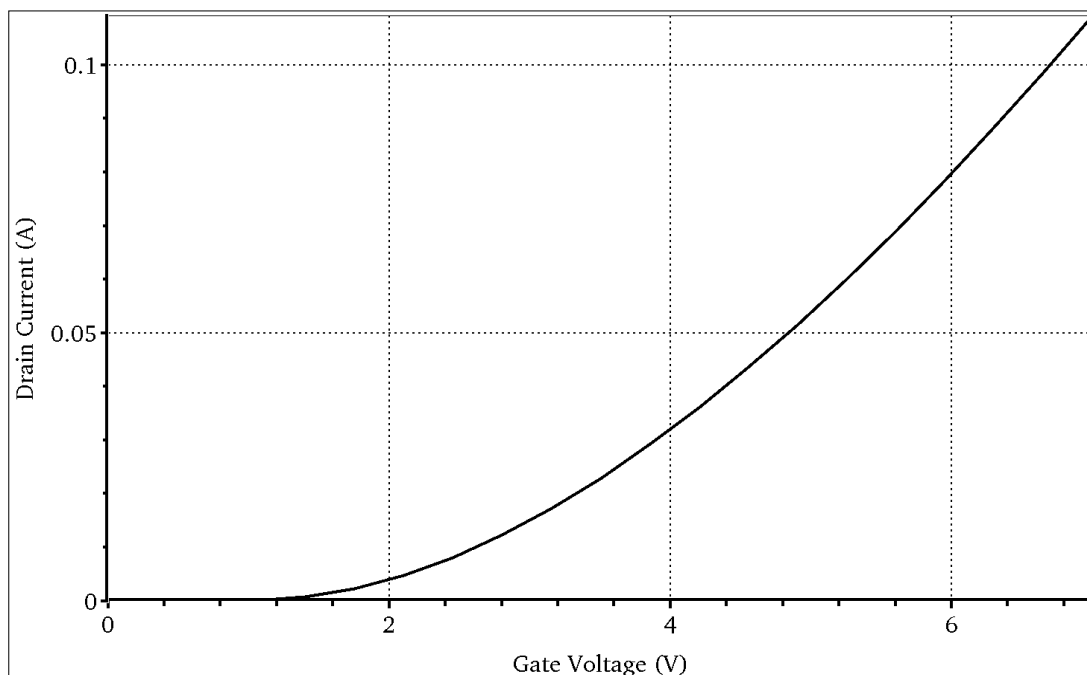
```
ft_scalar VT1 $VT1
```

Определение крутизны передаточной вольт-амперной характеристики:

```
set S [ f_gm IdVg ]
```

```
ft_scalar S $$
```

На рисунке 2.13 приведена передаточная вольт-амперная характеристика *n*-МОП-структуры с длиной канала 4 мкм при напряжении сток-исток 10 В. Пороговое напряжение, определённое по касательной, составляет 3,41 В, по уровню тока стока 0,1 мкА – 0,62 В. Крутизна характеристики равна 32 мА/В.



*Рис. 2.13. Передаточная вольт-амперная характеристика *n*-МОП-транзистора с длиной канала 4 мкм при напряжении сток-исток 10 В*

2.5.2. Семейство выходных вольт-амперных характеристик, сопротивление сток-исток в открытом состоянии в линейной области и в области насыщения

Семейство выходных вольт-амперных характеристик рассчитывается и визуализируется во второй связке модулей **SDevice** и **Inspect** проекта *n*-МОП-транзистора. При расчёте изменяется напряжение на стоке при фиксированном смещении на затворе. Второй командный файл модуля **SDevice** будет иметь отличие по сравнению с предыдущим (листинг 2.3) в секции Solve{...}:

```
Solve {  
Poisson  
Coupled { Poisson Electron Hole}
```

** Задание семейства напряжений на затворе:*

** Сохранение каждого напряжения на затворе*

** в соответствующие файлы 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 стоковых вольт-амперных характеристик
 * для каждого напряжения на затворе,
 * загруженного из соответствующих файлов vg1-vg5.
 * Сохранение рассчитанных стоковых характеристик в файлы 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 } } }
```

Командный файл второго модуля **Inspect** для расчёта семейства выходных вольт-амперных характеристик и определения сопротивления сток-исток в области насыщения и линейной области приведён в листинге 2.5.

Листинг 2.5

```
# Загрузка данных с результатами из SDevice:
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 и отображение выходных вольт-амперных характеристик:
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 графиков:

```

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 осей координат:

```

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]
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

```

На рисунке 2.14 приведено семейство выходных вольт-амперных характеристик для *n*-МОП-структуры с длиной канала 4 мкм. Сопротивление сток-исток в открытом состоянии в линейной области составило 17,3 Ом, в области насыщения – 2,7 кОм.

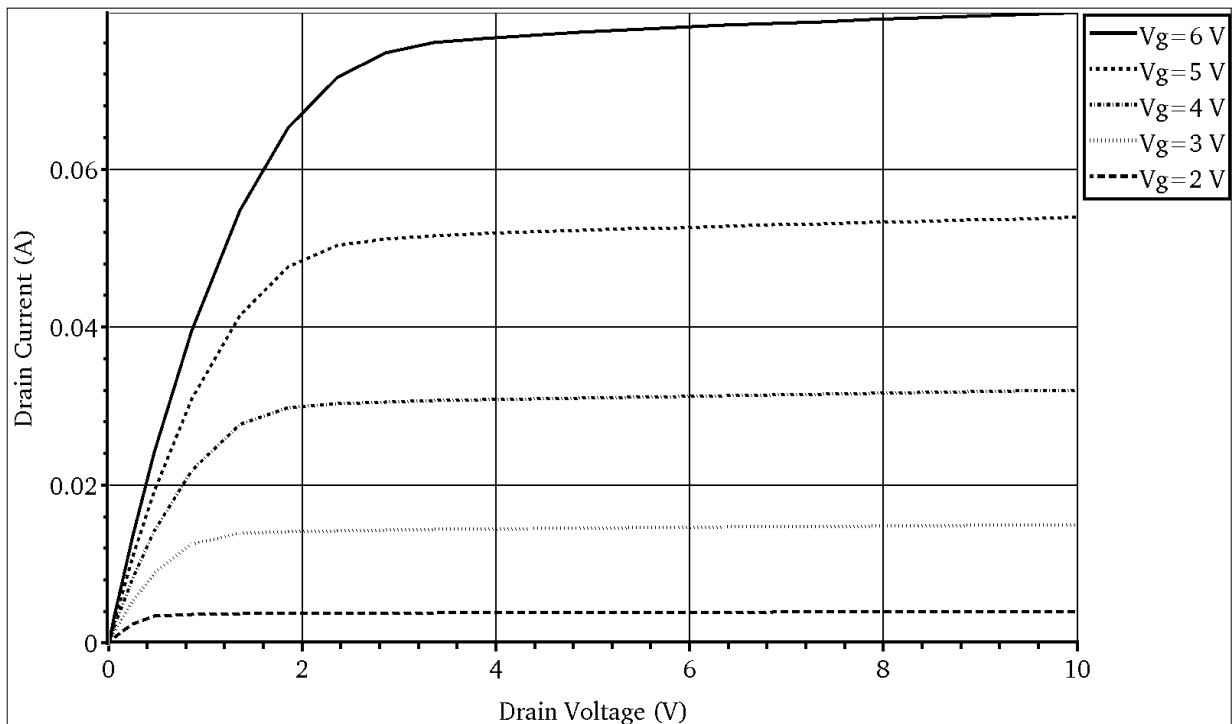


Рис. 2.14. Семейство выходных вольт-амперных характеристик для n -МОП-структуры с длиной канала 4 мкм

2.5.3. Пробивное напряжение

Пробивное напряжение определяется с помощью метода построения вольт-амперных характеристик. Данный метод практически ничем не отличается от расчёта передаточных вольт-амперных характеристик, только при этом необходимо учесть лавинную генерацию носителей и повышать напряжение на стоке до уровня, при котором n -МОП-транзистор заведомо пробьётся. Напряжение на затворе при этом устанавливается равным 0 В. Вносятся следующие изменения в командном файле первой связки модуля **SDevice** (листинги 2.3):

- в секции `Electrode{...}` указывается резистор 200 Ом, который подключается 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}  } ;
```

- секции Physics{...} в блоке моделей генерационно-рекомбинационных процессов указываются модели лавинной генерации, рекомбинации Оже и генерации путём туннельного перехода зона-зона:

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

- в секции Plot{...} указывается распределение скорости лавинной генерации:

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

- необходимые изменения добавляются в секцию 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 } }
save(FilePrefix = "vbr") }
```

Пробивное напряжение определяется как напряжение на стоке, при котором происходит резкое увеличение тока стока. Командный файл модуля **Inspect** для определения пробивного напряжения приведён в листинге 2.6.

Листинг 2.6

```
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 вольт-амперная характеристика n -МОП-структуры, рассчитанная с учетом лавинной генерации носителей, приведена на рисунке 2.15. Пробивное напряжение при этом составило величину $U_{np} = 13$ В.

На рисунках 2.16 и 2.17 соответственно показаны распределения электростатического потенциала и напряжённости электрического поля в n -МОП-структуре при напряжении на стоке, равном пробивному напряжению 13 В.

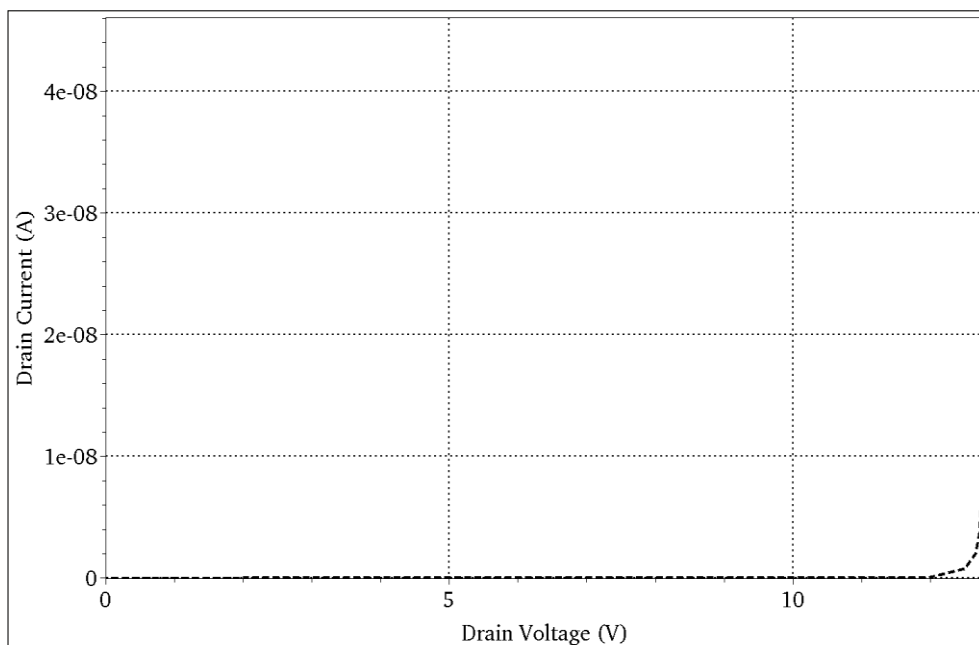


Рис. 2.15. Стоковая вольт-амперная характеристика n -МОП-структуры, рассчитанная с учётом лавинной генерации носителей

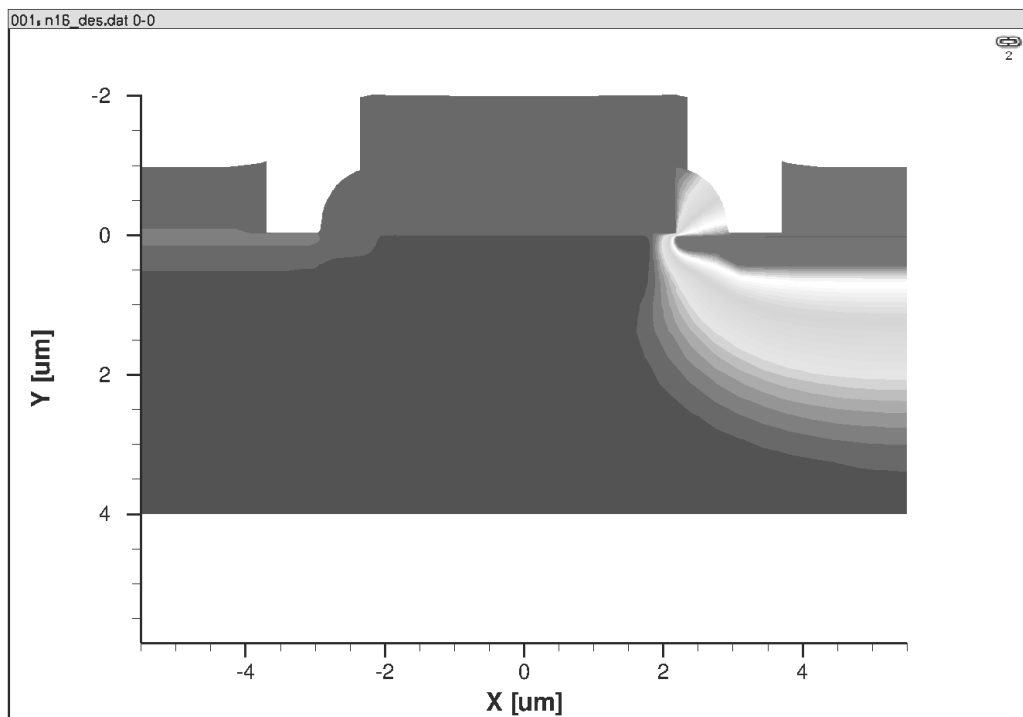


Рис. 2.16. Распределение электростатического потенциала в моделируемой p-МОП-структуре

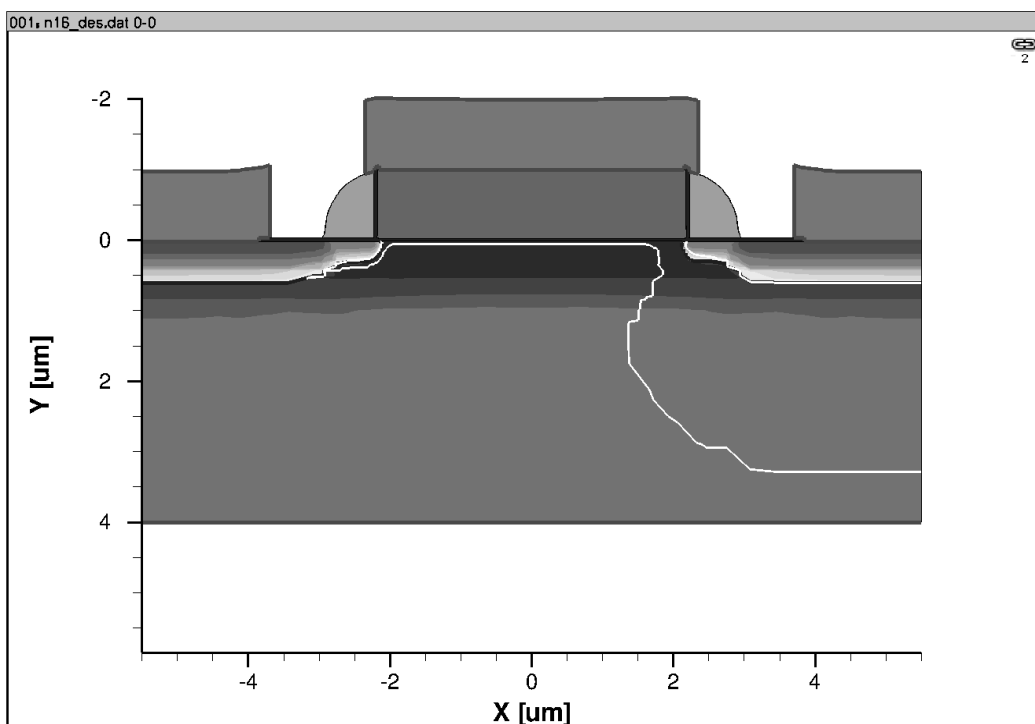


Рис. 2.17. Распределение напряжённости электрического поля в моделируемой p-МОП-структуре

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гуртов В. А. Твердотельная электроника / В. А. Гуртов. – Москва : Техносфера, 2007. – 408 с.
2. Зыков Д. Д. Системы автоматизированного проектирования технологических процессов и технологических маршрутов производства СВЧ МИС, оптимизация производства (основы САПР Synopsys TCAD) : учебное пособие / Д. Д. Зыков, К. Ю. Осипов. – Томск : В-Спектр, 2010. – 76 с.
3. Красников Г. Я. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов / Г. Я. Красников. – Москва : Техносфера, 2011. – 799 с.
4. Моделирование нанотранзисторов в TCAD Sentaurus : методическое руководство к лабораторному практикуму / С. В. Калинин [и др.]. – Новоси-бирск : Изд-во НГТУ, 2010 . – 100 с.
5. Основы работы в среде приборно-технологической САПР ISE TCAD : учебно-методическое пособие / сост. : В. В. Ассессоров [и др.]. – Воронеж : ЛОП ВГУ, 2006. – 61 с.
6. Пикулев В. Б. Основы моделирования планарных МДП-структур в физике твёрдого тела : учебное пособие / В. Б. Пикулев. – Петрозаводск : Изд-во ПетрГУ, 2005. – 74 с.
7. Технология, конструкции и методы моделирования кремниевых интегральных микросхем. Элементы и маршруты изготовления кремниевых ИС и методы их математического моделирования / М. А. Королев [и др.]. – Москва : Бинوم. Лаборатория знаний, 2009. – Ч. 2. – 422 с.
8. Глушко А. А. Приборно-технологическое моделирование в системе TCAD Sentaurus : учебно-методическое пособие / А. А. Глушко. – Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2015 . – 64 с.
9. Тихомиров П. Система Senraurus TCAD компании Synopsys / П. Тихомиров, П. Пфеффли, М. Зорзи. // Электроника : Наука. Технология. Бизнес. – 2006. – № 7. – С. 89-95.
10. Synopsys World Leader in EDA Software and Services. – (<http://www.synopsys.com/>)

Учебное издание

ПРИБОРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ
ПРОЕКТИРОВАНИЕ
ПОЛЕВЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ
ПРИБОРОВ

Учебно-методическое пособие

Составители:

Быстрицкий Алексей Викторович,
Быкадорова Галина Владимировна,
Пономарев Константин Геннадьевич,
Ткачёв Александр Юрьевич

Издано в авторской редакции

Подписано в печать 19.04.2017. Формат 60×84/16
Уч.-изд. л. 1,4. Усл. печ. л. 2,2. Тираж 25 экз. Заказ 247

Издательский дом ВГУ
394018 Воронеж, пл. им. Ленина, 10

Отпечатано с готового оригинал-макета
в типографии Издательского дома ВГУ
394018 Воронеж, ул. Пушкинская, 3