

ПЕРЕХОДНЫЕ ВОЛЬТАМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И КРУТИЗНА НАНО-МОП ТРАНЗИСТОРОВ СО СВЕРХТОНКИМ ОСНОВАНИЕМ

Б. К. Петров, А. А. Краснов

Воронежский государственный университет

Поступила в редакцию 15.09.2008 г.

Аннотация. Рассматриваются физические основы работы нано-МОП транзисторов со сверхтонким основанием. Выведены аналитические выражения для переходных вольтамперных характеристик и крутизны. Приведены рассчитанные зависимости $I_c = I_c(V_{зи})$ и $S = S(V_{зи})$ для нано-МОП транзисторов со структурой $n^{++}-n-n^{++}$.

Ключевые слова: нано-МОП транзистор, структура КНИ транзистора, ультратонкое основание, вольтамперная характеристика, крутизна.

Abstract. Physical bases of work of nano-MOS transistors with the ultrathin body are considered. Analytical expressions for transient voltage-current characteristics and steepness are deduced. Dependences $I_s = I_s(V_g)$ and $S = S(V_g)$ for $n^{++}-n-n^{++}$ structure of nano-MOS transistors are calculated.

Key words: nano-MOS transistor, SOI transistor structure, ultrathin body, current-voltage characteristic, steepness.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в новейших микропроцессорах с длиной канала $L_0 \leq 200 \text{ \AA}$ используются новые конструкции нано-МОП транзисторов. Например, в [1] описывается структура трехзатворного транзистора (tri-gate), предложенного компанией Intel, в [2] структура КНИ-транзистора с ультратонким основанием (Ultra-thin Body — UTB), т.е. транзисторы с полностью или частично обедненным основанием и транзистор с вертикально замещенным затвором (Vertical Replacement-Gate — VRG). Однако, теория описывающая работу этих приборов отсутствует в литературе, поэтому данная работа посвящена выводу аналитических выражений для переходной вольтамперной характеристики $I_c = I_c(V_{зи})$ и крутизны S нано-МОП транзисторов со сверхтонким основанием.

ВЫВОД ПЕРЕХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И ВЫРАЖЕНИЙ ДЛЯ КРУТИЗНЫ

Нано-МОП транзисторы с традиционной структурой $n^{++}-p+-n^{++}$ и инверсионным слоем (n -канал на $p+$ -подложке) невозможно сделать с длиной канала $L_0 < 200$ ангстрем (L_0 — расстояние между металлургическим $n^{++}-p+$ переходом истока и $p+-n^{++}$ стока) даже при концентрации акцепторов $N_{ap+} = 10^{19} \text{ см}^{-3}$ из-за явления смыкания этих $p-n$ переходов уже при напря-

жении $V_{си} = 0$. Тогда при напряжениях $с_{и} > 1 \text{ В}$ возможен уже туннельный пробой. Структуры со сверхтонким основанием или кремний на изоляторе (КНИ) изготавливаются по технологии SIMOX (Separation by Implantation of Oxygen) [3]. (Разделение с помощью имплантации кислорода). Технология SIMOX заключается в имплантации большой дозы кислорода, который при последующем отжиге реагирует на определенной глубине с кремнием и формирует заглубленный слой окисла (buried oxide). Выше этого слоя после отжига образуется свободный от дефектов слой, который служит подложкой n -типа толщиной $200-300 \text{ \AA}$, $N_{dn} = 10^{17} \text{ см}^{-3}$, в которой затем создают имплантацией фосфора n^{++} области истока и стока с $N_{dn^{++}} = 10^{20} \text{ см}^{-3}$ и толщиной $x_n = x_{co} = 100 \text{ \AA}$ (см. рис. 1). Затем на n -области термическим окислением создается затворный окисел SiO_2 толщиной $d_{\text{SiO}_2} = 15..20 \text{ \AA}$, на который напылением в вакууме создают затворный электрод из металлов с большой работой выхода Φ_m : хром ($\Phi_{Cr} = 4,60 \text{ эВ}$), никель ($\Phi_{Ni} = 4,50 \text{ эВ}$), вольфрам ($\Phi_{W} = 4,52 \text{ эВ}$). Работа выхода из n -Si $\Phi_{nSi} = \chi_{Si} + E_g/2q - q\Psi_B = 4,05 + 0,55 - q\Psi_B$, где χ_{Si} — внешняя работа выхода из кремния (расстояние от уровня покоящегося электрона в вакууме до дна зоны проводимости), $\Psi_{Bn} = kT/q \ln N_{dn}/n_i$ — объемный потенциал в n -кремнии ($= 0,4085..0,4684 \text{ В}$ при $N_{dn} = 10^{17}..10^{18} \text{ см}^{-3}$), оказывается равной $4,1915..4,1316 \text{ В}$ при $N_{dn} = 10^{17}..10^{18} \text{ см}^{-3}$. Из приведенных значений работ выхода из n -Si Φ_{nSi}

оказывается всегда ниже работы выхода из металла затвора Φ_m на 0,40..0,30 эВ. Тогда электроны из n -Si подложки начинают переходить за счет термоэлектронной эмиссии над барьером из слоя SiO_2 на границу раздела металл затвора — слой SiO_2 , а в n -слое остаются положительно заряженные доноры. В результате образуются контактная разность потенциалов $\varphi_{\text{кМз-}n\text{-Si}} = \Phi_m - \Phi_{n\text{-Si}} = 0,4..0,3 \text{ В}$.

Типичные толщины тонкого слоя n -Si составляют $d_n = 200..300 \text{ \AA}$, изолирующего оксида от n -подложки $d_{\text{SiO}_2\text{изол}} = 500..1000 \text{ \AA}$, затворного оксида $d_{\text{SiO}_2\text{затв}} = 15..20 \text{ \AA}$, сильно легированных $n++$ -Si областей истока и стока $x_{\text{ис}} = x_{\text{ст}} = 100 \text{ \AA}$. Длина обедненной n -области между истоком и стоком $L_0 = 200..400 \text{ \AA}$.

В этом случае контактная разность потенциалов: $\varphi_{\text{кМз-}n\text{-Si}}$ равна сумме падений напряжений на затворном окисле V_{SiO_2} и на обедненном n -слое V_n :

$$\varphi_{\text{кМз-}n\text{-Si}} = V_{\text{SiO}_2} + V_n, \quad (1)$$

$$V_{\text{SiO}_2} = \frac{2(Q_d + Q_{\text{дырок}})}{2\varepsilon_0\varepsilon_{\text{SiO}_2}} \cdot d_{\text{SiO}_2} = \frac{qN_{dn}x_n + Q_{\text{дырок}}}{\varepsilon_0\varepsilon_{\text{SiO}_2}} \cdot d_{\text{SiO}_2}, \quad (2)$$

где $Q_d = qN_{dn}x_n$ — плотность доноров в обедненном n -слое. Падение напряжения на обедненном n -слое создаёт поле от отрицательного заряда на затворном электроде $Q_3 = -(Q_{\text{дырок}} + Q_d)$:

$$E_{x\text{зат}} = \frac{Q_3}{2\varepsilon_0\varepsilon_{\text{Si}}} = -\frac{(Q_{\text{дырок}} + Q_d)}{2\varepsilon_0\varepsilon_{\text{Si}}}, \quad (3)$$

а также положительное поле (вдоль оси ОХ) от тонкого инверсионного слоя дырок ($\Delta x_{\text{инв}} = 30..50 \text{ \AA}$)

$$E_{x\text{дырок}} = \frac{Q_{\text{дырок}}}{2\varepsilon_0\varepsilon_{\text{Si}}}. \quad (4)$$

Тогда падение напряжения V_n на обедненном слое в n -области толщиной $x_n = L_{\text{доб.сл}}$ будет описываться выражением:

$$V_n = -\frac{(Q_d + Q_{\text{дырок}})}{2\varepsilon_0\varepsilon_{\text{Si}}} x_n + \frac{Q_{\text{дырок}}}{2\varepsilon_0\varepsilon_{\text{Si}}} x_n = -\frac{Q_d}{2\varepsilon_0\varepsilon_{\text{Si}}} x_n \quad (5)$$

и

$$|V_n| = \frac{Q_d}{2\varepsilon_0\varepsilon_{\text{Si}}} x_n = \frac{qN_{dn} \cdot x_n \cdot x_n}{2\varepsilon_0\varepsilon_{\text{Si}}}. \quad (6)$$

Падение напряжения на затворном окисле и на обедненном n -слое в сумме должны давать контактную разность потенциалов $\varphi_{\text{кМз-}n\text{-Si}}$:

$$\varphi_{\text{кМз-}n\text{-Si}} = \frac{qN_{dn}x_n + Q_{\text{дырок}}}{\varepsilon_0\varepsilon_{\text{SiO}_2}} \cdot d_{\text{SiO}_2} + \frac{qN_{dn} \cdot x_n^2}{2\varepsilon_0\varepsilon_{\text{Si}}}. \quad (7)$$

Теперь рассмотрим МОП транзистор со структурой $n++-n-n++$ при подаче положительного затворного напряжения относительно истока ($V_{\text{зи}} > 0$) и отсутствии напряжения исток-

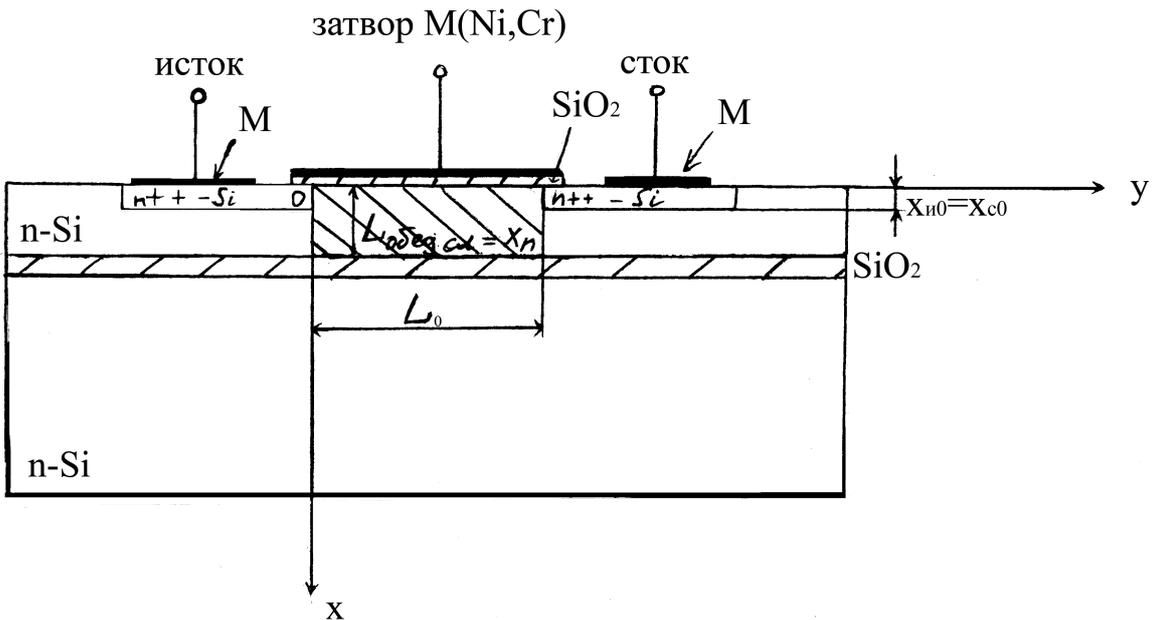


Рис. 1. Структура $n++-n-n++$ наномонолитного МОП транзистора при отсутствии затворного ($V_{\text{зи}} = 0$) и стокового ($V_{\text{си}} = 0$) напряжений

сток ($V_{\text{си}} = 0$). Под действием одной к.р.п. между затворным электродом и n -слоем $\varphi_{kM3-n-Si}$ затворный электрод находится под отрицательным потенциалом $-\varphi_{kM3-n-Si}$ относительно n -слоя. Если на затворный электрод подать положительное напряжение $V_{\text{зи}}$ точно равное абсолютной величине $\varphi_{kM3-n-Si} = 0,3..0,4$ В, тогда исчезнет отрицательный заряд электронов на затворном электроде, n -обедненный слой становится электронейтральным ($n_n = N_{dn}$) и исчезает инверсионный слой из дырок в результате перехода электронов из затворного электрода в n -Si слой по проводникам между истоком и затвором.

Теперь, если между истоком и стоком подать напряжение $V_{\text{си}} > 0$ (\oplus на $n++$ -стока и $(-)$ на $n++$ -области истока), то через квазинейтральный n -слой потечет ток стока:

$$I_c = qV_{de} \cdot N_{dn} \cdot x_n \cdot Z, \quad (8)$$

где Z — ширина канала, $V_{de} = \mu_n(E_y) \cdot E_y$ — дрейфовая скорость электронов в n -слое, E_y — предельная составляющая поля $E_y = \frac{V_{\text{си}}}{L_0}$.

Поскольку при $V_{\text{си}} \geq 0,1$ В и $L_0 = (200..400 \text{ \AA}) = (2..4) \cdot 10^{-6}$ см в реальных nano-MOP транзисторах, то $E_y = (5..2,5) \cdot 10^5$ В/см, то $V_{de} = V_{ds} = 1 \cdot 10^7$ см/с — дрейфовая скорость насыщения электронов в сильных полях ($E_y > 2 \cdot 10^4$ В/см) в кремнии.

Выведем переходную вольтамперную характеристику $I_c = f(V_{\text{зи}})$ при $V_{\text{зи}} > V_{\text{отп}}$.

Считаем, что $Q_{\text{дырок}} = 0$, и толщина n -слоя $x_n \geq L_{\text{доб.сл.}}$, в результате аналогично выражению (7) получаем квадратное уравнение для нахождения толщины обедненного слоя $L_{\text{доб.сл.}}$ в зависимости от напряжения $V_{\text{зи}}$:

$$\frac{qN_d}{2\epsilon_0\epsilon_{\text{Si}}} L_{\text{доб.сл.}}^2 + \frac{qN_{dn}}{C'_{\text{SiO}_2}} L_{\text{доб.сл.}} - (\varphi_{kM3-n-Si} - V_{\text{зи}}) = 0 \quad (9)$$

или

$$L_{\text{доб.сл.}}^2 + \frac{2\epsilon_0\epsilon_{\text{Si}}}{C'_{\text{SiO}_2}} L_{\text{доб.сл.}} - \frac{2\epsilon_0\epsilon_{\text{Si}}}{qN_{dn}} (\varphi_{kM3-n-Si} - V_{\text{зи}}) = 0, \quad (10)$$

где $C'_{\text{SiO}_2} = \frac{\epsilon_0\epsilon_{\text{SiO}_2}}{d_{\text{SiO}_2}}$ — удельная емкость затворного окисла. Отсюда находим

$$L_{\text{доб.сл.}} = -\frac{1}{2} \cdot \frac{2\epsilon_0\epsilon_{\text{Si}}}{C'_{\text{SiO}_2}} \pm \sqrt{\left(\frac{1}{2} \cdot \frac{2\epsilon_0\epsilon_{\text{Si}}}{C'_{\text{SiO}_2}}\right)^2 + \frac{2\epsilon_0\epsilon_{\text{Si}}}{qN_{dn}} (\varphi_{kM3-n-Si} - V_{\text{зи}})}. \quad (11)$$

Физический смысл имеет, очевидно, решения со знаком (+) перед корнем:

$$L_{\text{доб.сл.}} = -\frac{1}{2} \cdot \frac{2\epsilon_0\epsilon_{\text{Si}}}{C'_{\text{SiO}_2}} + \sqrt{\left(\frac{1}{2} \cdot \frac{2\epsilon_0\epsilon_{\text{Si}}}{C'_{\text{SiO}_2}}\right)^2 + \frac{2\epsilon_0\epsilon_{\text{Si}}}{qN_{dn}} (\varphi_{kM3-n-Si} - V_{\text{зи}})}. \quad (12)$$

Поскольку ток стока протекает через область в n -слое толщиной $(x_n - L_{\text{доб.сл.}})$, то с учетом выражения (8) для тока стока в зависимости от затворного напряжения $V_{\text{зи}} > V_{\text{отп}}$ получаем окончательную формулу:

$$I_c = qV_{ds} \cdot N_{dn} [x_n - L_{\text{доб.сл.}}(V_{\text{зи}})] \cdot Z = qV_{ds} \cdot N_{dn} \left[x_n + \frac{2\epsilon_0\epsilon_{\text{SiO}_2}}{C'_{\text{SiO}_2}} - \sqrt{\left(\frac{1}{2} \cdot \frac{2\epsilon_0\epsilon_{\text{Si}}}{C'_{\text{SiO}_2}}\right)^2 + \frac{2\epsilon_0\epsilon_{\text{Si}}}{qN_{dn}} (\varphi_{kM3-n-Si} - V_{\text{зи}})} \right] \cdot Z. \quad (13)$$

$$- \sqrt{\left(\frac{1}{2} \cdot \frac{2\epsilon_0\epsilon_{\text{Si}}}{C'_{\text{SiO}_2}}\right)^2 + \frac{2\epsilon_0\epsilon_{\text{Si}}}{qN_{dn}} (\varphi_{kM3-n-Si} - V_{\text{зи}})} \cdot Z.$$

Из формул (12), (13) следует, что при $V_{\text{зи}} \rightarrow \varphi_{kM3-n-Si}$ $L_{\text{доб.сл.}} \rightarrow 0$, а квадратная скобка в формуле (13) стремится к толщине x_n высокоомного n -слоя. Как видно из выражения (13), ток стока не зависит от напряжения сток-исток $V_{\text{си}}$, поскольку $V_{\text{си}} > 0,1$ В продольное поле $E_y \geq 5 - 2,5 \cdot 10^4$ В/см и дрейфовая скорость электронов V_d в кремнии достигает насыщения $V_{ds} = 1 \cdot 10^7$ см/с.

Найдём с помощью выражения (13) основной усилительный параметр nano-MOP транзистора — крутизну $S = \frac{dI_c}{dV_{\text{зи}}}|_{V_{\text{си}}=\text{const}}$.

$$S = qV_{ds} \cdot N_{dn} \cdot Z \cdot \frac{1}{2} \times \frac{\frac{2\epsilon_0\epsilon_{\text{Si}}}{qN_{dn}}}{\sqrt{\left(\frac{1}{2} \cdot \frac{2\epsilon_0\epsilon_{\text{Si}}}{C'_{\text{SiO}_2}}\right)^2 + \frac{2\epsilon_0\epsilon_{\text{Si}}}{qN_{dn}} (\varphi_{kM3-n-Si} - V_{\text{зи}})}}. \quad (14)$$

Из формулы (14) следует, что максимальное значение крутизны S_{max} имеет место при $V_{\text{зи}} = \varphi_{kM3-n-Si}$.

$$S_{\max} = qV_{ds} \cdot N_{dn} \cdot Z \cdot \frac{1}{2} \cdot \times \frac{2\epsilon_0 \epsilon_{Si}}{2\epsilon_0 \epsilon_{Si} \cdot 0,5} = Z \cdot C'_{SiO_2} \cdot V_{ds}. \quad (15)$$

Для сравнения в обычных МОП транзисторах с n -каналом и со структурой $n++-p+-n++$ крутизна S постоянна в режиме насыщения дрейфовой скорости, не зависит от затворного напряжения $V_{зи}$ и также описывается выражением (15) [4]:

$$S_{\text{МОП}} = Z \cdot C'_{SiO_2} \cdot V_{ds}. \quad (16)$$

Из формулы (15) следует, что максимальная крутизна нано МОП транзистора S_{\max} зависит только от ширины канала Z и удельной величины емкости затворного окисла $C'_{SiO_2} = \frac{\epsilon_c \epsilon_{SiO_2}}{d_{SiO_2}}$.

При напряжениях $V_{зи} = \varphi_{kM_3-n-Si}$ начинает возникать слой накопления электронов на поверхности n -области под затворным окислом и ток стока будет состоять теперь из двух составляющих

$$I_c = qV_{ds}N_{dn}X_nZ + V_{ds}(V_{зи} - \varphi_{kM_3-n-Si})C'_{SiO_2}Z. \quad (17)$$

В формуле (17) 2-й член представляет собой ток электронов через слой накопления. Крутизна

$$S = \left. \frac{dI_c}{dV_{зи}} \right|_{V_{зи}=\text{const}}$$

на основании формулы (17) будет равна

$$S = V_{ds}C'_{SiO_2}Z. \quad (18)$$

По формулам (13) (14) (17) (18) были рассчитаны зависимости тока стока $I_c = f(V_{зи})$ и крутизны $S = S(V_{зи})$ при разных значениях концентрации доноров и толщины затворного окисла и для никелевого затворного электрода ($\Phi_{Ni} = 4,50$ эВ). Предварительно для каждого значения N_{dn} определялась минимальная толщина n -слоя $X_n \leq L_{d,обед}$.

Из рис. 2 и 3 видно, что при нулевом смещении на затворе $V_{зи}$ транзистор закрыт, при достижении $V_{зи} = 0,15$ В транзистор открывается и через него начинает течь ток, при $V_{зи} \leq \varphi_{kM_3-n-Si}$ ток стока плавно растет с ростом приложенного затворного напряжения $V_{зи}$. При достижении $V_{зи} = \varphi_{kM_3-n-Si}$, появляется слой накопления электронов, и ток стока I_c становится пропорционален затворному напряжению $V_{зи}$. Увеличение концентрации доноров приводит к линеаризации ВАХ в области $V_{зи} \leq \varphi_{kM_3-n-Si}$.

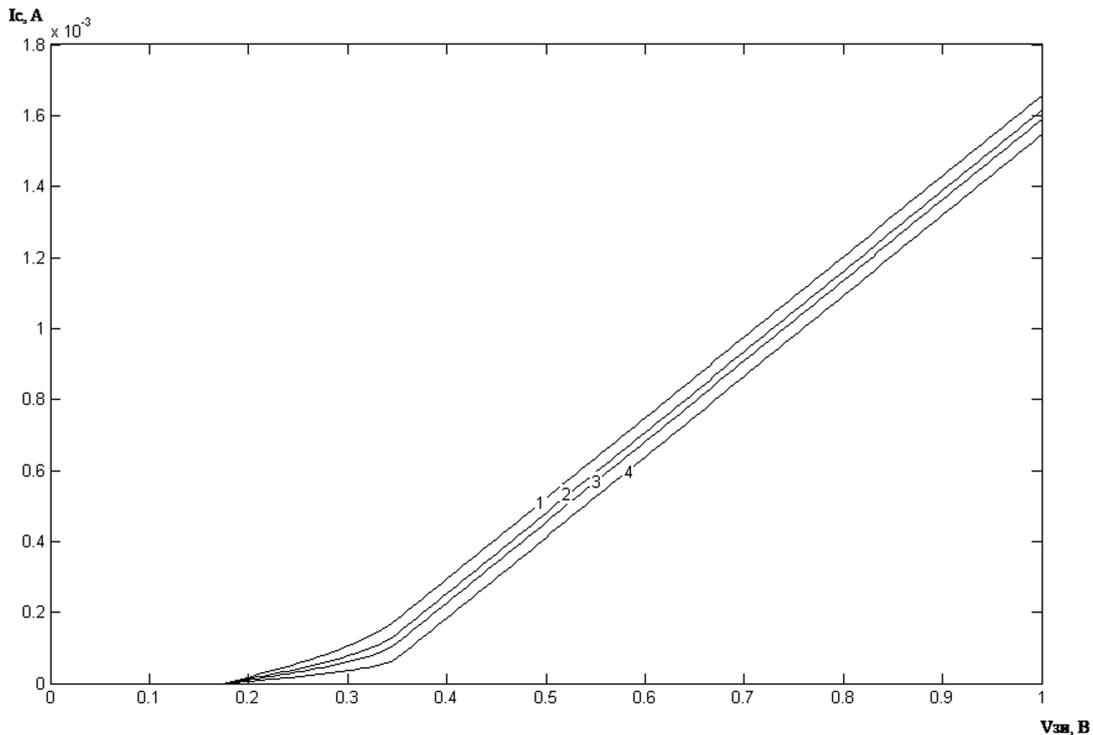


Рис. 2. Зависимость тока стока I_c от затворного напряжения $V_{зи}$ для значений N_{dn} : 1 — 10^{18} см^{-3} ; 2 — $5 \cdot 10^{17}$ см^{-3} ; 3 — $3 \cdot 10^{17}$ см^{-3} ; 4 — 10^{17} см^{-3} и толщины подзатворного окисла 15 Å

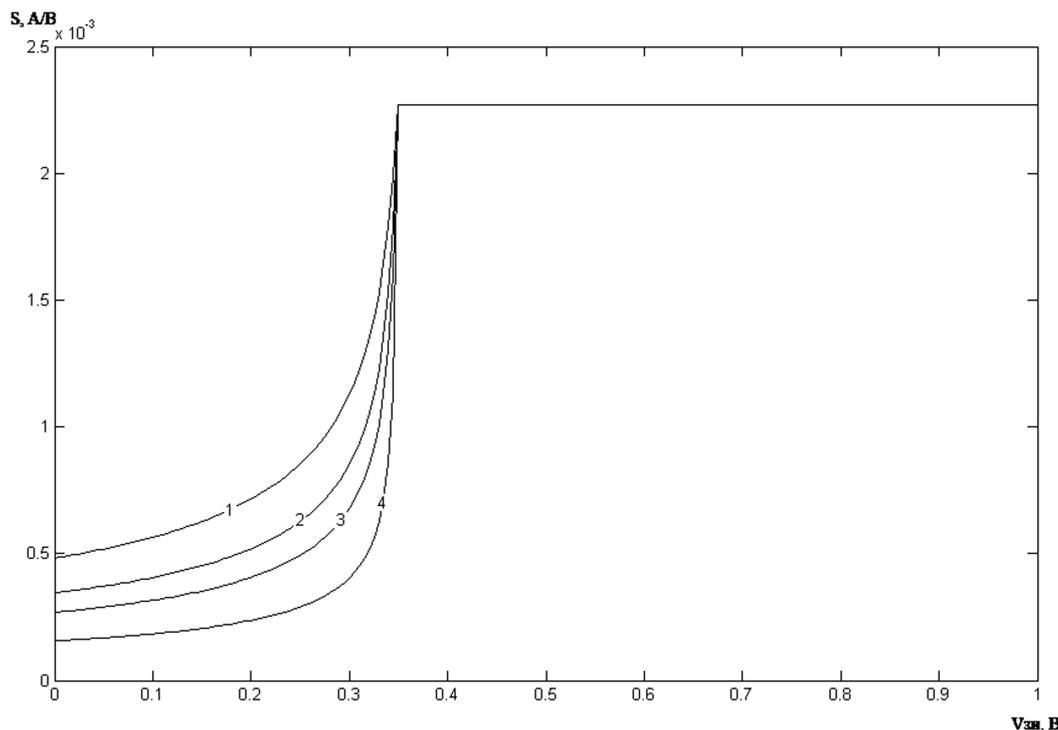


Рис. 3. Зависимость крутизны S от затворного напряжения $V_{зи}$ для значений $N_{дн}$: 1 — 10^{18} см^{-3} ; 2 — $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$; 3 — $3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$; 4 — 10^{17} см^{-3} и толщины подзатворного окисла 15 \AA

Крутизна S при $0 < V_{зи} < \phi_{kM3-n-Si}$ возрастает согласно уравнению (14), и при достижении $V_{зи} = \phi_{kM3-n-Si}$ достигает насыщения и дальше перестает зависеть от приложенного на затвор напряжения $V_{зи}$. Также наблюдается, что увеличение концентрации доноров повышает крутизну в области $0 < V_{зи} < \phi_{kM3-n-Si}$, но при переходе в насыщение зависимость от концентрации доноров отсутствует.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, для nano-MOP транзисторов со структурой $n^{++}-n-n^{++}$ на сверхтонком основании:

- выведены аналитические выражения для переходной вольтамперной характеристики $I_c = I_c(V_{зи})$ и крутизны S ;

- с помощью этих выражений были рассчитаны зависимости тока стока и крутизны от напряжения затвор-исток для данного типа MOP транзисторов с типичными значениями электрофизических параметров.

Установлено, что крутизна S достигает насыщения при $V_{зи} \geq \phi_{kM3-n-Si}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Майская В. Транзисторы компании Intel с тройным затвором / В. Майская. // Электроника: НТБ. — 2002. — № 3. — С. 50–52.
2. Майская В. Будущие транзисторные структуры / В. Майская. // Электроника: НТБ. — 2002. — № 3. — С. 64–67.
3. Драгунов В.П. Основы нанoeлектроники / В. П. Драгунов, И. Г. Неизвестный, В. А. Гридчин. — М.: Логос. — 2006. — 496 с.
4. Зи С. Физика полупроводниковых приборов / С. Зи. — М.: Мир. — 1984. — Т. 2. — 456 с.

Петров Борис Константинович — профессор кафедры физики полупроводников и микроэлектроники ВГУ, д. т. н.; тел.: 208-633.

Краснов Александр Александрович — студент 5-го курса физического факультета кафедры физики полупроводников и микроэлектроники ВГУ; тел.: 208-633.

Boris K. Petrov — the professor of chair of physics of semiconductors and microelectronics of physical faculty of the Voronezh state university

Alexander A. Krasnov — the 5 year student of chair of physics of semiconductors and microelectronics of physical faculty of the Voronezh state university. E-mail: krasnov@telecomvl.ru.