

УДК 621382.53733:621.317

А.Д. АНДРЕЕВ, В. М. БОРЗДОВ, А.А. ВАЛИЕВ, О.Т. ЖЕВНЯК, С.Г. МУЛЯРЧИК, И.М. ШЕВКУН

ФОРМИРОВАНИЕ ПРОВОДЯЩЕГО КАНАЛА В ВЫСОКОЛЕГИРОВАННОМ n МОП-ТРАНЗИСТОРЕ В ЛИНЕЙНОМ РЕЖИМЕ РАБОТЫ

The conditions of conductive channel formation in high doped MOSFETs are discussed. It is shown that approximation substrate doped profile near surface silicon and of the inversion layer localization takes the opportunity to account for the mobility distribution towards substrate as well as source and drain depletion meet.

Использование высоколегированных подложек либо структурного канала с несколькими карманами с высоким значением концентрации ионизированной примеси позволяет осуществить переход к размерам 0,1 мкм и менее проводящих областей кремниевых интегральных МОП-транзисторов [1-5]. Как известно (см. [5, 6]), протекание тока в таких транзисторах будет иметь ряд особенностей, характерных для короткоканальных приборов. Ранее [4, 5] нами было показано, что величина тока стока для линейного режима работы короткоканального транзистора может быть оценена с высокой точностью при помощи достаточно простой модели при условии, что подвижность электронов в канале постоянна. Это, однако, выполнимо только в том случае, когда перенос подавляющего большинства электронов происходит в проводящем канале с незначительным градиентом примеси по глубине.

В этой связи в настоящей работе рассматриваются условия, обеспечивающие постоянное значение подвижности по глубине области протекания подвижного заряда в короткоканальном МОП-транзисторе для линейного режима его работы. Оценим размеры данной области, их влияние на величину тока стока, изменение концентрации ионизированной примеси бора в подложке транзистора, а с помощью кинетического моделирования методом Монте-Карло - изменение подвижности электронов в направлении глубины подложки.

Как известно [5-7], при увеличении уровня легирования подложки МОП-транзистора переход к насыщению тока стока I_D происходит при напряжении на стоке, меньшем или сравнимом с удвоенным потенциалом в нейтральном объеме кремния. В этом случае величину I_D можно рассчитать по формуле [5]:

$$I_D = \mu C_0 \frac{W}{L} [(V_G - V_T)V_D - b_0 V_D^2], \quad (1)$$

где μ - подвижность электронов (предполагается постоянной по длине канала), C_0 - удельная емкость подзатворного окисла, W и L - ширина и длина канала, V_G , V_D , V_T - напряжения затвора, стока и пороговое соответственно,

$b_0 = \frac{1}{2} + \frac{f\sqrt{2\varepsilon_{Si}eN_A}}{3C_0\sqrt{2\phi_f + V_B}}$ - коэффициент, определяющий нелинейную составляющую

тока стока, f - параметр, учитывающий эффекты короткого канала, ε_{Si} - диэлектрическая проницаемость кремния, N_A - концентрация примеси в подложке, $\phi_f = (kT/e)\ln(N_A/n_i)$ - потенциал нейтральной области подложки, V_B - напряжение смещения этой области. Так как при $V_D < 2\phi_f + V_B$ отношение μ/μ_0 близко к единице, где $\mu_0 = (\partial I_D / \partial V_D)_{V_D \rightarrow 0} / C_0 (W/L)(V_G - V_T)$ - подвижность электронов на начальном участке ВАХ, то уравнение (1) приобретает вид [4]:

$$I_D = \left(\frac{\partial I_D}{\partial V_D} \right)_{V_D \rightarrow 0} \left(V_D - \frac{b_0 V_D^2}{V_G - V_T} \right). \quad (2)$$

В результате взаимодействия зарядов в областях истокового перехода $d_1 = \sqrt{2\varepsilon_{Si}(V_0 - V_1)/eN_A}$, стокового перехода $d_2 = \sqrt{2\varepsilon_{Si}(V_0 + V_2)/eN_A}$ и обедненной области подложки под затвором в режиме сильной инверсии $x_{dm} = \sqrt{4\varepsilon_{Si}\phi_f/eN_A}$ формируется эффективный заряд q_1 . Величина этого заряда пропорциональна площади трапеции $ABDE$ (рис. 1) и равна $q_1 = e(L + L_2)x_{dm}wN_A/2$.

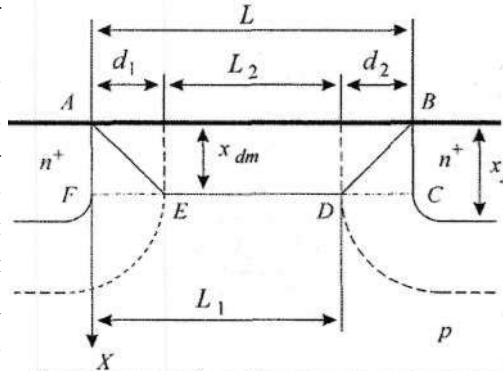


Рис. 1. Размеры областей пространственного заряда в МОП-транзисторе

Здесь $V_0 = (kT/e)\ln(N_A N_D / n_i^2)$, $V_2 = V_0 (\sqrt{1 + 4V_D/V_0} - 1)$, V_1 - встроенный потенциал n^+ - p -переходов стока и истока, падение напряжения на стоке и истоке соответственно [4], N_D - концентрация примеси в n -области, n_i - собственная концентрация носителей заряда в кремнии. Для прибора с $N_D = 10^{26} \text{ м}^{-3}$ и $N_A = 10^{21} + 10^{24} \text{ м}^{-3}$ при $T = 300 \text{ К}$ ($n_i \approx 1,6 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-3}$) $V_0 = 0,9 + 1,1 \text{ В}$ и $\phi_f = 0,3 + 0,6 \text{ В}$. Отношение величины эффективного заряда к полному заряду области обеднения под затвором $q = eLx_{dm}wN_A$, пропорциональному площади прямоугольника $ABCF$ (см. рис. 1), будет равно $q_1/q = (L + L_2)/2L$

В линейном режиме работы прибора, изготовленного с использованием высоколегированных подложек, справедливо условие $V_D \ll V_G - V_T$ ($V_0 > V_1, V_2$). В этом случае слабо подавляется инверсионный заряд и отношение $x_{dm}/d_2 \approx \sqrt{2\phi_f/V_0}$ можно считать близким единице [8]. Это позволяет упростить выражение $L_2 = L + x_j - \sqrt{x_j^2 + 2x_j d_2 + d_2^2 - x_{dm}^2}$, приведя его к виду $L_2 = L - x_j (\sqrt{1 + 2x_{dm}/x_j} - 1)$ [7], в результате чего величину эффективного заряда можно рассчитать согласно

$q_1 = q \left[1 - \frac{x_j}{L} \left(\sqrt{1 + \frac{x_{dm}}{x_j}} - 1 \right) \right] = qf$. При условии постоянства N_A по глубине x_{dm} [4]

можно вычислить пороговое напряжение в виде $V_T = 2\phi_f + V_{FB} + fQ_A/C_0$, где V_{FB} - напряжение плоских зон, $Q_A = \sqrt{2e\epsilon_{Si}N_A(2\phi_f + V_b)}$ - поверхностная плотность заряда акцепторов у истока.

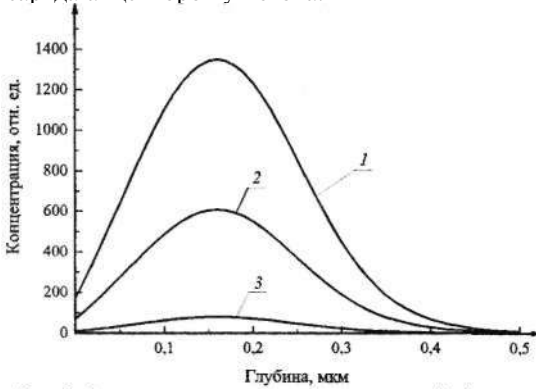


Рис. 2. Распределение примеси в подзатворной области прибора для доз: D_1 (1), D_2 (2) и D_3 (3)

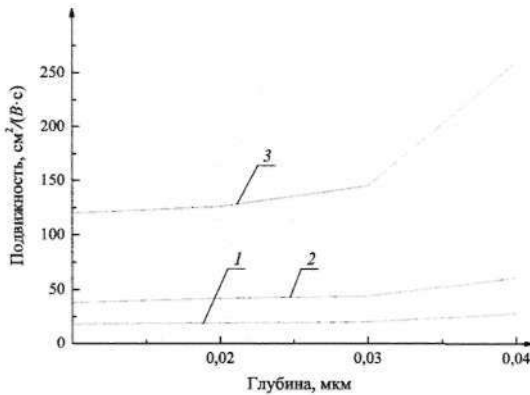


Рис. 3. Подвижность электронов в канале МОП-транзистора для 1-го (1), 2-го (2) и 3-го (3) профиля

тать вследствие растекания линий тока в глубину подложки [9]. Если предположить, что такое растекание происходит в пределах области обеднения под затвором, то концентрацию примесных атомов N_A необходимо подбирать таким образом, чтобы глубина n^+ -стока, который собирает электроны, инжектируемые из проводящего канала, была сравнима с величиной x_{dm} , но при этом соблюдалось условие отсутствия смыкания областей объемного заряда стока и истока [4, 8]:

$$N_A > \frac{2\epsilon_{Si}(V_0 + V_2)}{e(L - L_1)^2}.$$

В процессе окисления поверхность кремния, легированного бором, обедняется примесными атомами и размер $L_1 = L - d_2$ уменьшается при продвижении из глубины подложки, где N_A имеет наибольшее значение, к границе Si - SiO₂ из-за роста d_2 ,

относительное изменение которого $\frac{d_2(x=0)}{d_2(x=x_M)} = \sqrt{\frac{N_A(x=x_M)}{N_A(x=0)}}$, где $N_A(x=x_M)$,

$N_A(x=0)$ - концентрация примеси в максимуме и на границе Si - SiO₂ соответ-

ственно. Максимальная величина $d_2(x=0)$ будет равна $d_2(x=x_M) \sqrt{\frac{N_A(x=x_M)}{N_A(x=0)}}$, а

Сравнивая измеренные и рассчитанные на основании выражения (2) ВАХ тестового транзистора ($N_A = 6 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$, $L = 3 \text{ мкм}$, $W = 12 \text{ мкм}$, $x_j = 0,3 \text{ мкм}$, $x_{ox} = 0,35 \text{ мкм}$, $V_T = 40 \text{ В}$, $V_B = 0$) для заданных значений $(\partial I_D / \partial V_D)_{V_D \rightarrow 0}$ в интервале напряжений $V_G = 55 \div 75 \text{ В}$, можно отметить, что при выходе тока в насыщение рассчитанное напряжение $V_{DE} = (V_G - V_T) / 2b_0$ близко к измеренному V_{DS} [4, 5] и величина коэффициента $b_0 = (V_G - V_T) / 2V_{DS} \approx 16$, который мало изменяется в заданном диапазоне напряжений $(V_G - V_T)$ и. Для транзистора с $N_A = 10^{24} \text{ м}^{-3}$, $L = 0,2 \text{ мкм}$, $W = 10 \text{ мкм}$, $x_j = 40 \text{ нм}$, $x_{ox} = 3 \text{ нм}$ в интервале напряжений $V_G = 0,8 \div 2,0 \text{ В}$ [1] коэффициент $b_0 \approx 1$ и $V_{DE} \approx V_{DS}$, где x_j - глубина залегания стокового и истокового $p-n$ -переходов, x_{ox} - толщина подзатворного диэлектрика.

Толщина инверсионного слоя x_i при перемещении электронов от истока к стоку может возрастать

минимальная $L_1(x=0)$ - соответственно $[L - d_2(x=0)]$, которая при допустимом напряжении пробоя $n^+ - p$ -перехода стока обеспечивает слабое взаимодействие переходов для заданного сопротивления проводящего канала [4, 8].

В пределах инверсионного слоя электроны дрейфуют от истока к стоку в областях с различной концентрацией Na по глубине. Средняя линия трапеции $ABDE$ $(L + L_2)/2 \approx \sqrt{L}$ располагается в промежуточной области растекания линий тока и может характеризовать эффективную длину канала $\sqrt{L}$. Предельное значение x_j [10] можно оценить из соотношения токов эмиссии в окисел и тепловой генерации носителей заряда на переходе стока [11], что позволяет рассчитать профиль подвижности электронов с учетом распределения примесных атомов в подложке транзистора.

Для того чтобы оценить степень изменения подвижности электронов по глубине, с помощью программы SUPREM II [12] была рассчитана зависимость $Na(x)$. Моделировался техпроцесс, включающий имплантацию бора (энергия 50 КэВ) с последующим отжигом при температуре 900 °С в течение 60 мин. Использовались три дозы: $3,2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ (D_1), $1,4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ (D_2) и $1,8 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ (D_3). Результаты расчетов приведены на рис. 2, где концентрация примеси нормирована на величину 10^{21} м^{-3} . Как видно, профиль легирования для высокого значения концентрации существенно неоднороден, однако его влияние на подвижность имеет смысл только для расстояний $x < x_j$. В пределах $x < x_j$ ($x_j \sim 0,03 \text{ мкм}$ [7]) изменение концентрации примеси, особенно для низкого уровня легирования, можно считать достаточно слабым (см. рис. 2).

В [5] отмечалось, что по области растекания линий тока значение подвижности электронов не остается постоянным. Зависимость подвижности от координаты в глубину подзатворной области в пределах расстояния x -, для начального участка ВАХ МОП-транзистора с $L_1 = 0,1 \text{ мкм}$ (рис. 3) рассчитывалась на основе кинетического моделирования электронного переноса методом Монте-Карло по стандартному алгоритму синхронного ансамбля [13]. Полученные результаты свидетельствуют о том, что в данных условиях подвижность носителей заряда в подзатворной области МОП-транзистора относительно слабо изменяется по направлению в глубь подложки при $x < x_j$. Наблюдаемое небольшое ее увеличение с ростом координаты x при низких концентрациях примеси, как показывает моделирование, вызвано специфическими для рассматриваемых условий неоднородностями напряженности электрического поля и концентраций примеси и электронов в данном направлении. Рис. 3 подтверждает также очевидный факт заметного уменьшения подвижности при существенном увеличении концентрации примеси, причем чем выше значение последней и, как следует из рис. 2, больше ее градиент, тем меньше изменяется подвижность по направлению в глубь подложки. Это связано с тем, что непостоянство подвижности по координате x обусловлено в основном существенным изменением концентрации электронов вдоль этого направления. Однако при высоком уровне легирования абсолютные значения электронной концентрации и ее изменений значительно меньше концентрации ионизированной акцепторной примеси.

Таким образом, нами рассмотрены условия формирования проводящего канала в высоколегированном «МОП-транзисторе для линейного режима его работы. Рассчитаны соответствующие ВАХ и профили распределения примеси в подложке, а также распределения подвижности электронов в глубину подложки. Показано, что с ростом уровня легирования обеспечивается как непрерывность проводящего канала для тока электронов, так и постоянство значения подвижности по глубине растеканий линий тока в короткоканальном МОП-транзисторе.

1. Hiroshi Iwai // Proc. 21st. Confrens. On Microelectron. (MIEL'97). Nis, Yugoslavia, 14–17 September. №5, 1997. Vol. 1. P. 11.
2. Taur Y., Wann C.H., Frank D.J. // IEDM Tech. Dig. 1998. P. 789.
3. Thompson S., Packan P., Bhor M. // IntelTech. J. 1998. Vol. Q3. P. 1.
4. Андреев А. Д., Борздов В. М., Валиев А. А. и др. // Вестн. БГУ. Сер. 1. 2004. № 3. С. 42.
5. Андреев А. Д., Борздов В. М., Валиев А. А. и др. // Там же. 2005. № 3. С. 13.
6. Fischetti M., Laux S.E., Crabbe E. // J. Appl. Phys. 1995. P. 1058.

7. Маллер Р., Кейминс Г. Элементы интегральных схем. М., 1989. С. 503.
8. Андреев А.Д., Валиев А.А., Жевняк О.Г. и др. // Радиофизика и электроника: Сб. науч. тр. Мн., 2003. Вып. 6. С. 17.
9. Андреев А.Д., Борздов В.М., Валиев А.А. и др. // ИФЖ. 2003. Т. 76. № 4. С. 104.
10. Noda H., Murac F. et al. // IEEE Trans. Electron Dev. 1994. Vol. 41. № 10. P. 1831.
11. Андреев А.Д., Колковский И.И., Комаров Ф.Ф. и др. // Весці АН Беларусь Сер. фіз.-тэхн. навук. 2001. № 3. С. 87.
12. Антониалис Д. // МОП-СБИС. Моделирование элементов и технологических процессов / Под ред. П. Антонетти, Д. Антониалиса, Р. Даттона, У. Оулдхсма. М., 1988. С. 195.
13. Jacoboni C, Reggiani L. // Rev. Mod. Phys. 1983. Vol. 55. P. 645.

Поступила в редакцию 20.02.07.

Альберт Данилович Андреев - кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физической электроники.

Владимир Михайлович Борздов - доктор физико-математических наук, профессор кафедры физической электроники.

Александр Анатольевич Валиев - главный инспектор управления информационных технологий, статистики и анализа ГТК Республики Беларусь.

Олег Григорьевич Жевняк - кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физической электроники.

Степан Григорьевич Мулярчик - доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой информатики, декан факультета радиофизики и электроники.

Игорь Михайлович Шевкун - кандидат технических наук, доцент кафедры информатики.