

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

ВЛИЯНИЕ СЕГРЕГАЦИИ ПРИМЕСЕЙ НА СКВОЗНОЕ ОБЕДНЕНИЕ В N-КАНАЛЬНОМ МОП-ТРАНЗИСТОРЕ

При проектировании интегральных схем на МОП-транзисторах уменьшение длины канала и приложенных напряжений дополняется соответствующим увеличением уровня легирования подложки. Для заданной глубины n^+ областей стока и истока x_j взаимодействие зарядов в их обедненных областях $d_2 = \sqrt{2\epsilon_s(V_0 + V_2)/eN_A}$, $d_1 = \sqrt{2\epsilon_s(V_0 - V_1)/eN_A}$ соответственно и $x_{dm} = \sqrt{4\epsilon_s\phi_f/eN_A}$ под диэлектриком затвора в режиме сильной инверсии формирует эффективный заряд с поверхностной плотностью $Q_{A1} = FQ_A$, $F = 1 - \phi_f \left(\sqrt{1 + 2x_{dm}/x_j} - 1 \right)$ и пороговое на-

пряжение $V_T = 2\phi_f + V_{FB} + \frac{Q_{A1}}{C_0}$, $\phi_f = \frac{kT}{e} \ln \left[\frac{N_A}{n_i} \right]$, $V_0 = \frac{kT}{e} \ln \left[\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right]$, V_2 ,

V_1 – падение напряжения на n^+p переходах стока и истока соответственно, V_{FB} – напряжение плоских зон, C_0 – удельная емкость окисла [1]. Ток на начальном участке ВАХ рассчитывают по формуле [2]:

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

где α – подвижность электронов (считается постоянной по длине канала), W , L – ширина и длина проводящего канала соответственно, V_G , V_D – напряжение затвора и стока соответственно, $b_0 = 0.5 + \frac{F}{3C_0} \sqrt{\frac{2\epsilon_s e N_A}{2\phi_f + V_B}}$, ϵ_s – диэлектрическая постоянная кремния, N_A – уровень легирования подложки, V_B – напряжение, приложенное к подложке транзистора, $V_D < 2\phi_f + V_B$.

С повышением напряжения V_D обедненные области переходов сближаются и расстояние ϕL характеризует степень их сближения: $L - \phi L = d_1 + d_2$. На рис. 1 приведены используемые обозначения. Подставляя в это соотношение значения d_1 , d_2 , возводя в квадрат левую и правую части и выделяя концентрацию N_A , находим:

$$N_A = \frac{2\epsilon_s(V_0 + V_2)}{e(L - \phi L)^2} + \frac{V_0 - V_1}{V_0 + V_2} + 2 \sqrt{\frac{V_0 - V_1}{V_0 + V_2}}. \quad (2)$$

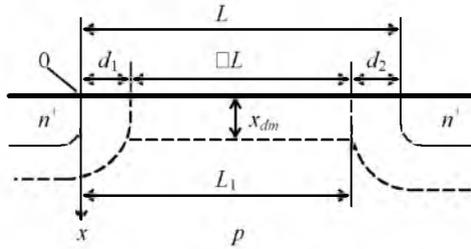


Рис. 1. Размеры областей пространственного заряда в МОП-транзисторе

Критическим размером может быть расстояние L_1 от внешнего края обедненной области перехода стока до границы n^+ истока. Равенство $[(L \square \square L)/(L \square \square L \square d_1)]^2 = [(d_1 + d_2)/d_2]^2$ включает множитель в квадратных скобках формулы (2). Этот результат соответствует одинаковым значениям N_A , полученным из соотношения (2) и по формуле

$$N_A = \frac{2 \square_S (V_0 + V_2)}{e(L \square L_1)^2}, \quad (3)$$

которая не содержит напряжение V_1 .

Величину напряжения V_2 для начального участка ВАХ ($V_D < V_{DS}$ – напряжение насыщения тока стока) определяют, воспользовавшись соотношением между полями $E_M = \sqrt{eN_A(V_0 + V_2)}/2 \square_S \square E = V_D/L$, условиями $Q_n \square C_0(V_G \square V_T) = \text{const}$ для $V_D \ll V_G - V_T$, то есть при слабом подавлении инверсионного заряда, $I_D = \text{const}$, $\alpha_1 E \square \alpha_2(E_M + E)$ и малом изменении дрейфовой скорости электронов по длине проводящего канала [1]. Обозначая далее $\square = (1 + E/E_M)$, $L_1 = L \square d_2$ и $\alpha_1 = \alpha_2 E_M \square / E$, находим $V_2 E/d_2 = (V_D \square V_2) E_M \square / L_1$. Решая это уравнение, получим

$$V_2 = \frac{V_0 \square}{2 \square} + \frac{V_D \square}{V_0 \square} \frac{L_1 \square}{L \square} \square \sqrt{1 + \frac{4V_D V_0}{(L_1 V_D / L \square V_D + V_0)^2}} \square \square \quad (4)$$

С увеличением уровня легирования подложки и длины канала $E_M \gg E$, $\square \square 1$, $L_1/L \square 1$ и $V_2 \square V_0 (\sqrt{1 + 4V_D/V_0} \square 1)/2$. На рис. 2 показана зависимость напряжения V_2 от V_D , рассчитанная из соотношения (4), для транзистора с $N_A = 4 \square 10^{23} \text{ м}^{-3}$, $w = 10 \text{ мкм}$, $L = 0.25 \text{ мкм}$, $x_j = 0.08 \text{ мкм}$, $x_{OX} = 0.056 \text{ мкм}$ [3]. Нелинейное уравнение (4) решалось с помощью математического пакета MathCAD.

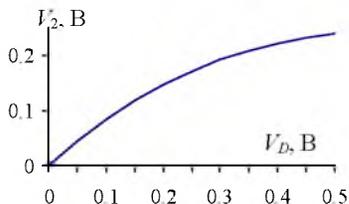


Рис. 2. Зависимость напряжения V_2 от напряжения на стоке для короткоканального МОП-транзистора

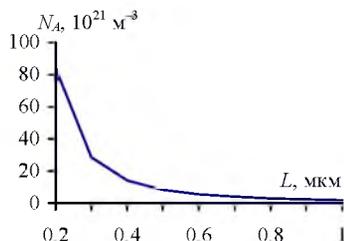


Рис. 3. Концентрация примеси в области канала в зависимости от его длины

С уменьшением длины канала необходимо уменьшать распространение области d_2 в подложку, что достигается уменьшением напряжения V_2 и увеличением концентрации N_A . В интервале значений $N_A = 10^{21} - 10^{24} \text{ м}^3$ в подложке, $N_D = 10^{26} \text{ м}^3$ – в n^+ области, $T = 300 \text{ К}$, встроенный потенциал $V_0 = 0.9 - 1.1 \text{ В}$ слабо влияет на изменение размера d_2 . Участок канала L_1 включает обедненную область d_1 и собственно канал $L - d_1 - d_2$. Для $N_A = 2 \cdot 10^{24} \text{ м}^3$ при минимально допустимом напряжении пробоя $n^+ - p$ перехода стока $d_2 = 0.04 \text{ мкм}$, $L = 0.1 \text{ мкм}$, $L_1 = 0.06 \text{ мкм}$ [4]. Пренебрежимо слабое взаимодействие переходов при заданном сопротивлении канала может сохраняться в интервале изменения $L = 0.2 - 1 \text{ мкм}$, если $L_1 \ll 0.06 \text{ мкм}$ и N_A определяется из соотношения (3). Рассчитанные по формуле (3) для $V_2 = 0.24 \text{ В}$ ($V_D = 0.5 \text{ В}$) значения концентраций примесных атомов для заданных длин каналов приведены на рис. 3 и соответствуют однородному распределению примесей по глубине подложки.

В процессе окисления поверхность кремния, легированного бором, обедняется примесными атомами и размер $L_1 = L \ll d_2$ уменьшается по направлению к границе раздела Si–SiO₂ вследствие увеличения d_2 . Относительное изменение этого размера при удалении от упомянутой границы $d_2(x = 0)$ в глубину подложки $d_2(x = x_M)$, где x_M – координата максимума профиля распределения примеси, составляет $d_2(x = 0)/d_2(x = x_M) = \sqrt{N_A(x = x_M)/N_A(x = 0)}$. Профиль распределения N_A рассчитывался с помощью программы SUPREM II [5] для двух транзисторов, изготовленных по стандартной технологии кремниевых интегральных схем, с параметрами $w = 24 \text{ мкм}$, $L = 3 \text{ мкм}$, $x_j = 0.5 \text{ мкм}$, общими для обоих приборов, доза имплантированной примеси $D = 10^{12} \text{ см}^{-2}$, ее энергия $E = 100 \text{ кэВ}$, время окисления $t_{OX} = 60 \text{ мин}$, температура окисления $T_{OX} = 1100 \text{ °C}$ ($x_{OX} = 0.107 \text{ мкм}$) для первого прибора и $D = 2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$,

$E = 100$ кэВ, $t_{OX} = 100$ мин, $T_{OX} = 1100$ °С ($x_{OX} = 0.16$ мкм) – для второго прибора. Значения концентрации N_A на границе и в максимуме профиля $1.16 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$ и $1.25 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$ соответственно для первого транзистора и $1.7 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$ и $1.8 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$ – для второго. Однако, когда температура окисления была снижена до 900 °С, что характерно для современной технологии кремниевых ИС, $x_{OX} = 0.027$ мкм для первого прибора и $x_{OX} = 0.034$ мкм – для второго и упомянутые концентрации равнялись $6.7 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$ и $3.9 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$ для первого транзистора и $3.0 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$ и $5.4 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$ – для второго.

В пределах толщины инверсионного слоя, $x_j \ll 10$ нм ($x_j \ll x_M$), отношение $[L - d_2(x = 0)]/[L - d_2(x = x_j)]$ близко к единице и расчетное значение концентрации примеси, предотвращающее сквозное обеднение канала при заданной величине $L - L_1$, может соответствовать N_A на внутренней границе инверсионного слоя ($x = x_j$), что снизит возможное воздействие инверсных электронов на часть перехода стока, которая выходит на границу раздела кремний-окисел.

Полученные результаты показывают, что при заданных значениях $L \ll L_1$ и V_2 исходный уровень имплантированных примесных атомов бора в подложке транзистора необходимо подбирать так, чтобы при нанесении подзатворного диэлектрика и обеднении поверхности кремния примесными атомами в процессе окисления концентрация N_A вблизи поверхности кремния в пределах локализации инверсионного слоя была сравнима с ее расчетным значением в соответствии с выражением (3). Это позволяет на начальном этапе технологического цикла обеспечить оптимальное соотношение между длиной канала и уровнем легирования подложки транзистора, избежать сквозного обеднения и последующей потери управления протекающим током.

ЛИТЕРАТУРА

1. Маллер Р., Кеймис Г. Элементы интегральных схем. М.: Мир, 1989. 630 с.
2. Андреев А. Д., Бельский А. М., Валев А. А. Аппроксимация начального участка ВАХ высоколегированного МОП-ПТ // Вестник Белорусского государственного университета. Серия 1. 2001. № 2. С. 19–22.
3. The dependence of the electron mobility on the longitudinal electric field in MOSFETs / J.B. Roldan, F. Gamiz, J.A. Lopez-Villanueva et al. // Semicond. Sci. Technol. 1997. Vol. 12. P. 321–330.
4. Folberth O. G., Bleher J. H. The fundamental limitations of the digital semiconductor technology // Microelectronics Journal. 1979. Vol. 9, № 4. P. 33–41.
5. Антониадис Д. Одномерное моделирование технологических процессов изготовления ИС // В сб. МОП-СБИС. Моделирование элементов и технологических процессов под ред. П. Антонетти, Д. Антониадиса, Р. Даттона, У. Оулдхема, М.: Радио и связь, 1988. 496 с.