

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ПРИМЕСИ И ДРЕЙФОВОЙ СКОРОСТИ ЭЛЕКТРОНОВ В ВЫСОКОЛЕГИРОВАННОМ КОРОТКОКАНАЛЬНОМ n МОП-ТРАНЗИСТОРЕ

The approximation of the highdopant MOSFET current-voltage characteristic before saturation is offered in the case, when there is discrepancy of the drain current saturation voltage in range $0-2\phi_f$ and effective gate voltage. This method allows to calculate drain current, impurity concentration, drift velocity and current saturation voltage in case when constructive technological parameters of the device are given. Account of the drain voltage dependence of the effective mobility is not necessary in this approximation.

Масштабное уменьшение размеров транзистора вынуждает повышать уровень легирования подложки, чтобы избежать сквозного обеднения проводящего канала. С ростом примесной концентрации возрастает крутизна начального участка вольт-амперной характеристики (ВАХ) прибора и переход к насыщению тока стока происходит при напряжении на стоке, меньшем или сравнимом с удвоенным потенциалом в нейтральной области подложки транзистора [1–3]. В процессе изготовления МОП-приборов из-за сегрегации уменьшается поверхностная концентрация примесных атомов в кремниевой пластине p -типа, что затрудняет расчет ее величины. Для транзисторов с малой длиной канала желательно иметь несложные и достаточно точные методы ее оценки. Применение методики, основанной на измерении емкости пространственного заряда в кремнии, ограничивается высокоомной подложкой, так как с ростом концентрации примесных атомов в подложке повышается емкость пространственного заряда, а ее вклад в суммарную емкость прибора падает по сравнению с вкладом емкости окисла. Для определения концентрации примесных атомов в подложке с высоким ($\sim 10^{24} \text{ м}^{-3}$) уровнем легирования применяются методики, основанные на измерении ВАХ МОП-транзистора с изолированным затвором на постоянном токе [4]. В данной работе рассмотрен способ определения концентрации примеси и дрейфовой скорости электронов в условиях высокого уровня легирования кремния.

Для расчета тока стока воспользуемся известной формулой, полученной по методике переменного заряда обедненной области подложки [2]:

$$I_D = \mu C_0 \frac{W}{L} \left\{ \left[(V_G - V_T) V_D + \frac{Q_{AS}}{C_0} V_D - \frac{V_D^2}{2} \right] - \frac{2}{3} \left[\frac{Q_{AD}}{C_0} (2\phi_f + V_B + V_D) - \frac{Q_{AS}}{C_0} (2\phi_f + V_B) \right] \right\}, \quad (1)$$

где μ – подвижность электронов (предполагается постоянной по длине канала), C_0 – удельная емкость подзатворного окисла, L , W – длина и ширина канала соответственно, V_G , V_D , $V_T = 2\phi_f + V_{FB} + Q_{AS}/C_0$ – напряжения на затворе, стоке и пороговое соответственно,

$$\phi_f = \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{N_A}{n_i} \right) \quad (2)$$

– потенциал нейтрального объема подложки, $Q_{AD} = \sqrt{2e\epsilon_{Si} N_A (2\phi_f + V_B + V_D)}$,

$Q_{AS} = \sqrt{2e\epsilon_{Si} N_A (2\phi_f + V_B)}$ – поверхностная плотность заряда ионизованных акцепторов на n^+p -переходах стока и истока соответственно, N_A – концентрация акцепторов в подложке, n_i – собственная концентрация носителей заряда в кремнии, V_B – напряжение, приложенное к подложке, ϵ_{Si} – диэлектрическая проницаемость кремния, e – заряд электрона.

Разлагая в ряд множитель $(2\phi_f + V_B + V_D)^{3/2} = (1 + V_D/(2\phi_f + V_B))^{3/2} (2\phi_f + V_B)^{3/2}$, входящий в произведение $Q_{AD} (2\phi_f + V_B + V_D)$, по переменной $V_D/(2\phi_f + V_B)$ получим [2]

$$I_D = \mu C_0 \frac{W}{L} [(V_G - V_T) V_D - b_0 V_D^2], \quad (3)$$

где $b_0 = 1/2$ при $V_D \ll 2\phi_f + V_B$ (ограничились двумя слагаемыми ряда) и

$$b_0 = \frac{1}{2} + \frac{f \sqrt{2e\epsilon_{Si} N_A}}{4C_0 \sqrt{2\phi_f + V_B}} \quad (4)$$

при $V_D < 2\phi_f + V_B$ (использованы три слагаемых) [5], $f = 1 - \frac{x_j}{L} \left(\sqrt{1 + \frac{2x_{dm}}{x_j}} - 1 \right)$ – коэффициент, учитывающий размерные эффекты короткого канала [3], x_{dm} , x_j – глубина обедненной области подложки под затвором при сильной инверсии и перехода стока соответственно.

Воспользуемся известным свойством МОП-структуры, которое проявляется в том, что при достижении порогового напряжения формируется полный инверсионный заряд, экранируется поле затвора, глубина обедненной области и заряд ионизованных акцепторов изменяются незначительно. Чтобы увеличить глубину этой области, на подложку подают напряжение $V_B \neq 0$. Будем различать следующие заряды: на затворе – Q_G , ионизованных акцепторов – Q_A , инверсных электронов – Q_n и эффективный заряд в окисле – Q_{SS} . В установившемся режиме $Q_G + Q_A + Q_n + Q_{SS} = 0$. При изменении V_G и V_B , если пренебречь инжекцией электронов в окисел, которая наблюдается только при очень больших V_B , изменяются заряды Q_G , Q_A и Q_n . Уравнение электронейтральности в новых условиях имеет вид $Q'_G + Q'_A + Q'_n + Q_{SS} = 0$. С увеличением V_B ток в канале уменьшается, поэтому, чтобы сохранить его на прежнем уровне, необходимо увеличить напряжение на затворе. Так как ток в канале пропорционален Q_n , то $Q'_G - Q_G = Q'_A - Q_A$. Из соотношения $Q_G = C_0 V_G$ имеем $C_0 V'_G - C_0 V_G = Q_A - Q'_A$. Подставляя в это выражение $Q_A = Q_{AD}$ для значений напряжения на подложке 0 и V_B , получим

$$C_0 (V'_G - V_G) = \sqrt{2e\epsilon_{Si} N_A} (\sqrt{2\phi_f + V_B + V_D} - \sqrt{2\phi_f + V_D}). \quad (5)$$

Формула (5) позволяет найти концентрацию примеси в подложке МОП-транзистора, измерив зависимости $I_D = f(V_G)$ для $V_B = 0$ и $V_B \neq 0$ при заданном напряжении на стоке V_D . Для этого перепишем (5) в виде

$$N_A = \frac{C_0^2 (V'_G - V_G)^2}{2e\epsilon_{Si}} \frac{1}{(\sqrt{2\phi_f + V_B + V_D} - \sqrt{2\phi_f + V_D})^2}. \quad (6)$$

Строго говоря, из-за (2) соотношение (6) является трансцендентным уравнением. Его можно решать численно, применив, например, одну из систем компьютерной математики (МАТЕМАТИКА, МАТЛАБ, МАТНСАД и т. п.). Однако, если достаточно «инженерной» точности, поступим следующим образом. Из технологических соображений будем полагать известными величины $N_{A \min}$ и $N_{A \max}$ ($N_{A \min} < N_A < N_{A \max}$). Используя соотношение (2), рассчитаем $\phi_{f \min}$, $\phi_{f \max}$ и в формулу (6) подставим $\phi_f = \bar{\phi}_f = (\phi_{f \min} + \phi_{f \max})/2$. Для оценки вносимой при этом погрешности воспользуемся сле-

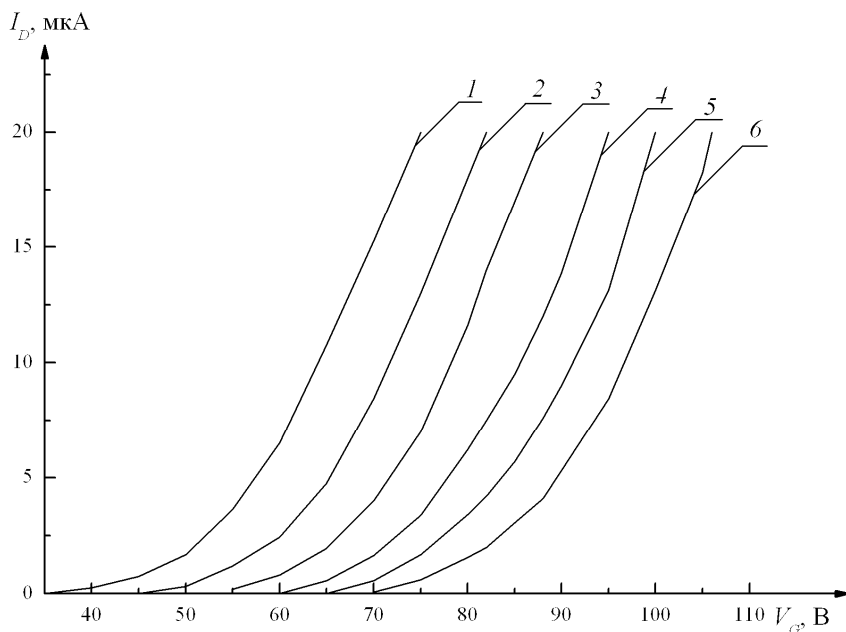
дующим правилом: если $y = f(x)$, то $|\Delta y| = \left| \frac{df}{dx} \right| |\Delta x|$. После несложных преобразований имеем

$$\frac{\Delta N_A}{N_A} = \frac{2\Delta\phi_f}{\left(\sqrt{2\phi_f + V_B + V_D} - \sqrt{2\phi_f + V_D} \right)} \left(\frac{1}{\sqrt{2\phi_f + V_D}} - \frac{1}{\sqrt{2\phi_f + V_B + V_D}} \right), \quad (7)$$

где $\Delta\phi_f$ – максимальная величина погрешности потенциала нейтрального объема подложки, равная $(\phi_{f \max} - \phi_{f \min})/2$. В таблице приведены рассчитанные нами значения относительной ошибки $\Delta N_A / N_A$ для некоторых величин V_D и V_B и двух интервалов возможного изменения N_A . Первый из этих интервалов приемлем для анализа МОП-транзисторов произвольной конструкции, второй – приборов со стандартной конфигурацией активных областей. Расчеты показывают, что величина ошибки уменьшается с ростом V_D и V_B , а также и при снижении интервала изменения N_A (см. таблицу).

Значения относительной ошибки $\Delta N_A / N_A$, %

Граничные значения N_A		$V_B = 0,5$ В	$V_B = 1$ В	$V_B = 1,5$ В	$V_B = 2$ В	$V_B = 2,5$ В
$N_{A \min} = 10^{21} \text{ м}^{-3}$ $N_{A \max} = 10^{26} \text{ м}^{-3}$	$V_D = 0,3$ В	21	18,5	16,5	15	14
	$V_D = 1$ В	14	13	11,5	11	10,5
	$V_D = 1,5$ В	11,5	10,5	9,5	9	8,5
$N_{A \min} = 10^{21} \text{ м}^{-3}$ $N_{A \max} = 10^{24} \text{ м}^{-3}$		$V_D = 1$ В	9	8	7,5	7
						6,5



Стокзатворная ВАХ МОП-транзистора при $V_B = 0$ (1), 0,2 (2), 0,4 (3), 0,6 (4), 0,8 (5), 1 В (6)

На рисунке приведены зависимости тока стока от напряжения на затворе (стокзатворные ВАХ) при $V_D = 0,3$ В и разных значениях V_B прибора с высоколегированной подложкой, измеренные нами при $T = 300$ К для тестового транзистора с длиной и шириной канала $L = 3$ мкм и $W = 24$ мкм и толщиной подзатворного окисла $x_{ox} = 0,4$ мкм. Подставляя в (6) значение $(V'_G - V_G)$, найденное из поведения кривых на рисунке, можно получить оценку N_A . При этом V'_G определяется при $V_B \neq 0$, а V_G – при $V_B = 0$ и одном и том же значении тока стока на линейном участке ВАХ.

Очевидно, более точное значение N_A будет соответствовать большему значению V_B (см. таблицу). Самая большая погрешность достигает 21 % для случая $V_D = 0,3$ В, $V_B = 0,5$ В и соответствующей им оценки $N_A \approx 7 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$. Согласно данным таблицы, уменьшить погрешность можно путем увеличения как V_B , так и V_D . Однако рост напряжения на стоке будет вызывать разогрев электронов и дрейф порогового напряжения, связанный с влиянием V_D на заряд обедненной области, особенно при $V_D \geq 2$ В [2, 3]. В этом случае величину $(V'_G - V_G)$, используемую в формуле (6), из приведенных ВАХ определять уже нельзя.

Помимо концентрации акцепторов в канале транзистора при малых значениях V_D можно оценить и величину дрейфовой скорости электронов в нем, исходя из следующих соображений. Взаимодействие зарядов обедненных областей стока $d_2 = \sqrt{2\epsilon_{Si}(V_0 + V_2)/eN_A}$, истока $d_1 = \sqrt{2\epsilon_{Si}(V_0 - V_1)/eN_A}$ и подзатворной области $x_D = \sqrt{4\epsilon_{Si}\phi_f/eN_A}$ формирует эффективный заряд с поверхностной плотностью $Q'_A = fQ_A$, а также определяет величину порогового напряжения $V'_T = 2\phi_f + V_{FB} + Q'_A/C_0$ [2]. Здесь $V_0 = (kT/e)\ln(N_A N_D/n_i^2)$ – встроенный потенциал [5], V_2 , V_1 – падения напряжения на переходах стока и истока соответственно, Q_A – поверхностная плотность заряда акцепторов для среднего значения N_A по глубине. При $V_D < 2\phi_f + V_B$ отношение подвижности μ , используемой в (1), к подвижности на начальном участке ВАХ $\mu_0 = \frac{(dI_D/dV_D)_{V_D \rightarrow 0}}{C_0(W/L)(V_G - V'_T)}$ близко к единице. Это означает, что в канале транзистора слабо подавляется инверсионный заряд [2]. Так как $Q_n \approx C_0(V_G - V'_T)$ – постоянно, то и ток в любом сечении канала постоянен, следовательно, величина дрейфовой скорости электронов также постоянна. Определив поле, создаваемое внешним источником V_D , как $E = V_D/L$, можно оценить величину дрейфовой скорости v_{dr} с помощью следующего соотношения:

$$v_{dr} \approx \mu_0 E = \frac{(dI_D/dV_D)_{V_D \rightarrow 0}}{C_0(W/L)(V_G - V'_T)} \frac{V_D}{L}. \quad (8)$$

Таким образом, приведенные экспериментальные и расчетные результаты показывают, что концентрацию примесных атомов в подложке МОП-транзистора можно определить при $V_D < 2\phi_f + V_B$ из

уравнения, полученного по методике переменного заряда обедненной области подложки, и условия электронейтральности. Используемое при этом среднее значение потенциала $2\phi_f$ в нейтральном объеме кремния в интервале $N_A = 10^{21} \div 10^{24} \text{ м}^{-3}$ вносит небольшую погрешность при выборе значений V_D и V_B не менее 1 В. Рассчитав пороговое напряжение с учетом влияния зарядов обедненных областей стока и истока, можно оценить также и величину дрейфовой скорости электронов в канале.

1. Андреев А.Д., Бельский А.М., Валиев А.А. // Вестн. БГУ. Сер. 1. 2001. № 2. С. 19.
2. Андреев А.Д., Валиев А.А., Жевняк О.Г. и др. // Там же. 2004. № 3. С. 42.
3. Андреев А.Д., Борздов В.М., Валиев А.А. и др. // Там же. 2007. № 2. С. 42.
4. Андреев А.Д., Бельский А.М., Савотин Ю.И., Ткач А.В. // Изв. АН БССР. Сер. физ.-мат. наук. 1978. № 12. С. 69.
5. Зи С. Физика полупроводниковых приборов: в 2 т. М., 1984. Т. 2. С. 453.

Поступила в редакцию 23.04.08.

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

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

Степан Григорьевич Мулярчик – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой информатики.

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

Дмитрий Сергеевич Сперанский – аспирант кафедры физической электроники. Научный руководитель – доктор физико-математических наук, профессор кафедры физической электроники В.М. Борздов.