

УДК 621.3.049.744

РАСЧЕТ СОПРОТИВЛЕНИЯ РАСТЕКАНИЯ СТОКА В МОЩНЫХ СВЧ МОП ТРАНЗИСТОРАХ

© 2004 Б. К. Петров, Р. Г. Григорьев, П. А. Меньшиков

Воронежский государственный университет

Для современных типов мощных СВЧ МОП транзисторов с вертикальной структурой и с переменной толщиной подзатворного окисла между истоковыми p^+ -ячейками предложена физическая модель для расчета сопротивления растекания стока. Получены формулы для сопротивления стока как в режиме усиления малого, так и в режиме большого сигнала, а также для предельных значений тока стока с учетом насыщения дрейфовой скорости электронов в n^- -области стока.

ВВЕДЕНИЕ

Сопротивление растекания стока в вертикальных СВЧ МОП транзисторах может стать ограничивающим параметром для максимального тока стока наравне с сопротивлением канала. Ранее [1, 2] приводились формулы для расчета сопротивления растекания в мощных вертикальных МОП транзисторах [1, 2], но предложенные модели позволяли производить расчет только в режиме усиления малого сигнала и не отражали реальное значение сопротивления растекания в режиме усиления большого сигнала. Изменение конструктивных и технологических параметров, таких как появление толстого под-

затворного окисла $d_{SiO_2} = 1 \text{ мкм}$, (рис. 1, 2) используемого для уменьшения проходной емкости $C_{зс}$, также требует создания новых методов расчетов сопротивления растекания в мощных вертикальных МОП транзисторах.

В [1] сопротивление растекания рассчитывается без учета толстого подзатворного окисла, и для случая усиления малого сигнала, когда в n^- -слое продольная составляющая поля $E_x < 5 \cdot 10^3 \text{ В/см}$ и дрейфовая скорость электронов не достигает насыщения ($V_{де} = \mu_n(E) \cdot E < V_{се} = 1 \cdot 10^7 \text{ см/с}$), в результате были получены следующие приближенные выражения:

$$R_{с\text{ рас}} = R_{\text{пар}} + R_{IV},$$

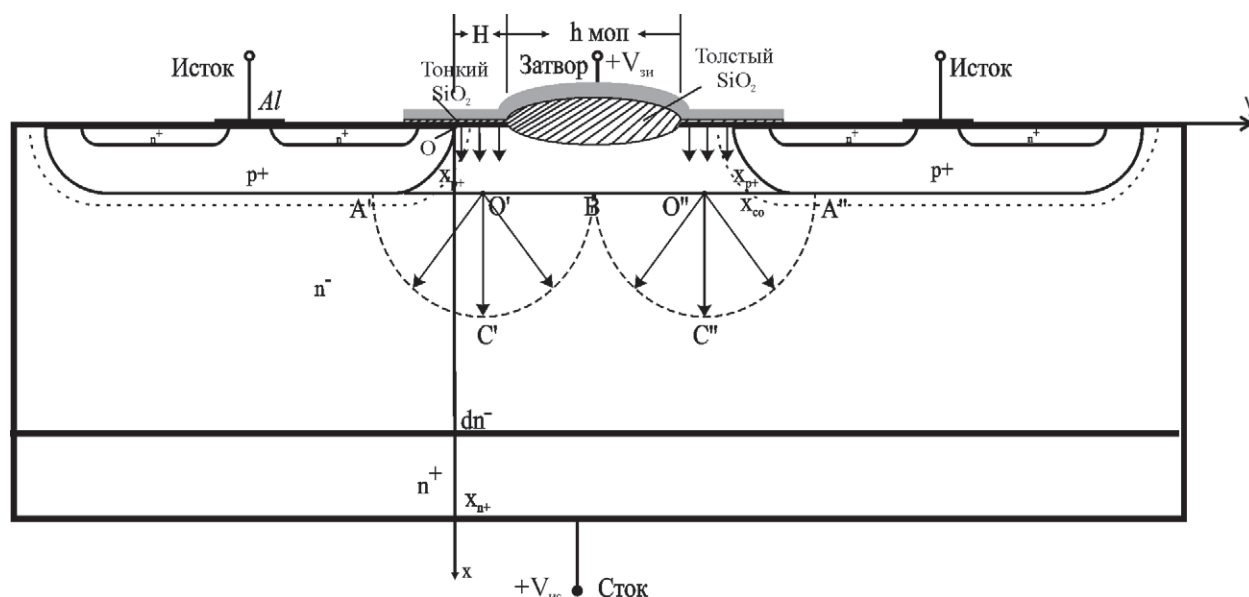


Рис. 1. Поперечное сечение единичной истоковой ячейки

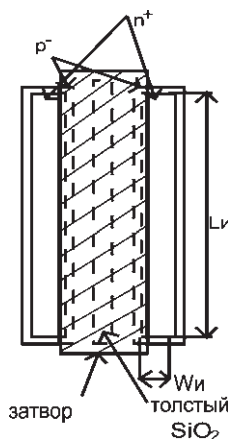


Рис. 2. Топология единичной истоковой ячейки

где $R_{\text{нар}}$ — сопротивление области паразитного канального транзистора, при $0 \leq x \leq x_p$ между соседними истоковыми p^- -ячейками определяемое по формуле:

$$R_{\text{нар}} = \frac{2 \cdot \rho_{n^-}}{Z} \left\{ \left[1 - \left(\frac{2 \cdot x_p}{L} \right)^2 \right]^{-1/2} \times \right. \\ \left. \times \text{tg}^{-1} \left[0,414 \cdot \left(\frac{L + 2 \cdot x_p}{L - 2 \cdot x_p} \right)^{1/2} \right] - \frac{\pi}{8} \right\};$$

R_{IV} — сопротивление трапецевидной области в n^- -области стока при $x_p \leq x \leq x_{n^-}$, равное:

$$R_{IV} = (\rho_{n^-} / Z) \text{tg}^{-1} \alpha \ln [1 + 2(h_1 / a) \text{tg} \alpha];$$

где L — длина затворного поликремния, Z — ширина истоковых ячеек, d_n — толщина n^- -слоя, x_p — глубина залегания истокового p - n перехода, $h_1 = d_n - x_p$, a — расстояние между истоковыми ячейками, $\alpha = 28^\circ - h_1 / a$.

РАСЧЕТ СОПРОТИВЛЕНИЯ РАСТЕКАНИЯ СТОКА В СЛАБЫХ ПОЛЯХ

В настоящей работе получены аналитические выражения для R_c при любых полях в n^- -слое. На рис. 1 на поверхности боковых участков p^+ -областей существует n -канал при $U_{\text{зи}} > U_{\text{пор}}$, а поверхность n^- -области при $0 \leq y \leq H$ и $H + h \leq y \leq 2H + h$ — слой накопления электронов, H — длина тонкого затворного окисла $d_{\text{SiO}_2} < 0,1 \text{ мкм}$, h — длина толстого окисла $d_{\text{SiO}_2} < 1 \text{ мкм}$, под которым слой накопления не образуется. При типичных значениях $H = 2 - 3 \text{ мкм} \geq x_p \leq 2 \text{ мкм}$,

можно считать в первом приближении, что электронный ток течет вдоль оси $0x$ в участках $0 \leq y \leq H$ и $H + h \leq y \leq 2H + h$ — строго вниз, то есть области протекания тока — параллелепипеды шириной Z_1 (Z_1 — ширина прямоугольных истоковых p -ячеек перпендикулярно к плоскости рис. 1), длиной H и толщиной x_p , вид сверху двух истоковых ячеек приведен на рис. 2.

Поэтому 1-я составляющая сопротивления стока $R_{\text{ст}}$ при малых полях $E_x < 5 \cdot 10^3 \text{ В/см}$ (при $\mu_n = \text{const}$) находится из очевидного соотношения:

$$R_{\text{ст1}} = \rho_{n^-} \frac{x_p}{HZN} = \rho_{n^-} \frac{x_p}{\Pi N}, \quad (1)$$

где $Z \cdot N = 1/2 \cdot \Pi$, Π — периметр канала, N — число истоковых ячеек, ρ_{n^-} — сопротивление n^- -слоя, x_p — толщина p -слоя.

Падение напряжения на $U_{\text{ст1}}$ на этой составляющей сопротивления стока $R_{\text{ст}}$ при заданном токе $I_{\text{стока}}$ будет равно:

$$U_{\text{ст1}} = I_{\text{стока}} R_{\text{ст}} = I_{\text{стока}} \rho_{n^-} \frac{x_p}{\Pi N}. \quad (2)$$

Теперь вычислим 2-ю составляющую сопротивления растекания стока $R_{\text{ст2}}$ в области n^- -слоя от $x = x_p$ до $x = x_p + (H + 0,5h)$ (до точек C' и C'' на рис. 1). Считаем в первом приближении, что в этой части n^- -слоя имеет место радиальное растекание электронов с центрами полуцилиндров в точках O' и O'' и внутренним радиусом основания $r_1 = 0,5H$ и внешним радиусом $r_2 = 1/2(H + 0,5h)$ (рис. 1).

Тогда электронный ток через цилиндр с радиусом $r_1 \leq r \leq r_2$ равен:

$$I_n(r) = \pi r j_n(r) 2NZ, \quad (3)$$

причем полный ток стока

$$I_{\text{ст}}(r) = \pi r j_{\text{ст}}(r_1) 2NZ, \quad (4)$$

причем радиальное распространение тока сохраняется до $r = r_2 = 0,5H + 0,5h$.

Причем $I_n(r) = I_{\text{ст}}$, следовательно, в результате приравнивания выражений (3) и (4) получим:

$$j_n(r) = j_n(r_1) \frac{r_1}{r}. \quad (5)$$

При $r = r_2$, из (5) получим, что $j_n(r_2) = j_n(r_1) r_1 / r_2 \leq 0,5 \cdot j_n(r_1)$, поскольку обычно $r_1 / r_2 \leq 0,5$, то есть на расстоянии от $x = x_p$ до $x = r_2 + x_p'$ плотность тока заметно убывает.

Кроме того если $E_x \leq 5 \cdot 10^3$ В/см, то

$$j_n(r) = q\mu_n E_2(r)n(r) = q\mu_n E(r)N_{dn}. \quad (6)$$

Подставляем выражение (6) для $j_n(r)$ в (9) и находим:

$$I_n(r) = I_{ct} = q\mu_n N_{dn} \pi r E_2(r) 2NZ. \quad (7)$$

Из (7) находим поле $E_2(r)$:

$$\begin{aligned} E_2(r) &= \frac{I_{ct}}{q \cdot \mu_n \cdot N_{dn} \cdot \pi \cdot r \cdot 2 \cdot N \cdot Z} = \\ &= \frac{I_{ct} \cdot \rho_{n^-}}{2 \cdot \pi \cdot N \cdot Z \cdot r} = \frac{I_{ct} \cdot \rho_{n^-}}{\pi \cdot \Pi \cdot r}. \end{aligned} \quad (8)$$

Следовательно, падение напряжения во второй области стока ($x \leq x_p \leq 0,5 \cdot (H+h)$) будет равно:

$$\begin{aligned} U_{ct2} &= \int_{x_p}^{0,5 \cdot (H+h)} E_2(r) dr = \frac{I_{ct} \cdot \rho_{n^-}}{\pi \cdot \Pi} \int_{x_p}^{0,5 \cdot (H+h)} \frac{1}{r} dr = \\ &= \frac{I_{ct} \cdot \rho_{n^-}}{\pi \cdot \Pi} \ln \left[\frac{0,5 \cdot (H+h)}{x_p} \right]. \end{aligned} \quad (9)$$

Тогда вторая составляющая сопротивления растекания стока R_{cm2} будет равна:

$$R_{ct2} = \frac{U_{ct2}}{I_{ct3}} = \frac{\rho_{n^-}}{\pi \Pi} \ln \left[\frac{0,5(H+h)}{x_p} \right]. \quad (10)$$

Найдем третью составляющую сопротивления растекания стока R_{ct3} в области $x_p + (H + 0,5h) < x < d_n$. Считаем, что в первом приближении в третьей области имеет место одномерное протекание тока через слой толщиной $d = d_n - (x_p + (H + 0,5h))$, где d_n — толщина n^- -слоя, длиной $l \geq 2H + h$ и шириной Z .

Тогда

$$\begin{aligned} R_{ct3} &\leq \frac{\rho_{n^-} [d_n - (x_p + (0,5H + h))]}{lZN/2} = \\ &= \frac{\rho_{n^-} [d_n - (x_p + (0,5H + h))]}{(2H + h) \cdot \Pi / 2}. \end{aligned} \quad (11)$$

Полное сопротивление растекания стока: $R_{ct} = R_{ct1} + R_{ct2} + R_{ct3}$.

Рассмотрим в качестве примера мощный СВЧ МОП транзистор с типичными значениями: $\rho_{n^-} = 1$ Ом/см, $N_{dn} = 4 \cdot 10^{15}$ см⁻³, $H = 2,0$ мкм, $h = 5$ мкм, $\Pi = 25$ см, $x_p = 2,0$ мкм, $d_n = 2,0$ мкм — толщина n^- -слоя, $l = 11$ мкм — расстояние между истоковыми p^+ -ячейками.

$$R_{ct1} = \rho_{n^-} \frac{x_p}{H\Pi} = 0,045 \text{ Ом},$$

$$R_{ct2} = \frac{\rho_{n^-}}{\pi \Pi} \ln \left[\frac{0,5 \cdot (H+h)}{x_p} \right] = 0,008 \text{ Ом},$$

$$R_{ct3} \leq \frac{\rho_{n^-} [d_n - (x_p + (0,5H + h))]}{(2H + h) \cdot \Pi / 2} = 0,04 \text{ Ом},$$

$$R_{ct} = R_{ct1} + R_{ct2} + R_{ct3} = 0,092 \text{ Ом}.$$

Из расчетов видно, что первая составляющая сопротивления растекания стока R_{ct1} вносит существенный вклад в полное значение $R_{ct} = R_{ct1} + R_{ct2} + R_{ct3}$.

РАСЧЕТ СОПРОТИВЛЕНИЯ РАСТЕКАНИЯ СТОКА R_{ct} В СИЛЬНЫХ ПОЛЯХ

При работе СВЧ МОП транзисторов в усилителях мощности амплитуда косинусоидального импульса тока стока может достигать значения максимального тока $I_{ct \text{ макс}}$, а в n^- -слое поле E_x приближается к значению $E_{ct} = 2 \cdot 10^4$ В/с, $V_{de} = 0,9V_{se \text{ нас}} = 0,9 \cdot 10^7$ см/с и падение напряжения U_{ct1} находится по другой формуле: $U_{ct1} = E_{kp} \cdot x_p$. Тогда первая составляющая сопротивления растекания стока будет равна: $R_{ct1} = U_{ct1} / I_{ct} = E_{kp} x_p / I_{ct}$. Вторую и третью составляющие сопротивления растекания стока можно насчитывать по тем же формулам, что и случае слабого поля, поскольку согласно формуле (5) в n^- -слое при $x > x_p$ $j_n(r) = 0,5 \cdot j_n(r_2)$ и следовательно $E_x < 5 \cdot 10^3$ В/см:

$$R_{ct2} = \frac{\rho_{n^-}}{\pi \Pi} \ln \left[\frac{0,5(H+h)}{x_p} \right], \quad (12)$$

$$R_{ct3} \geq \frac{\rho_{n^-} \cdot [d_n - (x_p + (0,5H + h))]}{(2H + h) \cdot \Pi / 2}. \quad (13)$$

Рассмотрим следующий численный пример для СВЧ МОП транзистора, с конструктивными параметрами, указанными в предыдущем разделе. Падение напряжения на сопротивлении R_{ct} при токе $I_{ct} = I_{c \text{ макс}} = 32$ А будет равно $U_{ct} = 4 + 1,524 = 5,524$ В при $x_p = 2$ мкм кроме того, надо учесть падение напряжения на канале $U_k \approx 0,5$ В (при $l_k = 1$ мкм, $V_{de \text{ кан}} = V_{se \text{ кас}}$) и на обогащенном n^+ -слое под тонким затворным окислом

$U_{n^+} = 1/2E_{кр}H = 2,0 \text{ В}$. Тогда $U_{ст\ полн} = 5,524 + 0,5 + 2,0 \approx 8,024 \text{ В}$, а первая составляющая сопротивления растекания стока

$$R_{ст1} = \frac{E_{кр}x_p}{I_{ст}} = \frac{4}{32} \approx 0,125 \text{ Ом}, \text{ что почти в 3 ра-}$$

за больше рассчитанного значения в слабых полях, $R_{ст1} = 0,045 \text{ Ом}$, а полное сопротивление стока $R_{ст}$ с учетом формул (12), (13) будет равно $R_{ст} = 0,173 \text{ Ом}$.

Ток через n -канал имеет максимальное значение:

$$I_{скан\ макс} = \Pi C_{SiO_2} (V_{зи} - V_{пор}) V_{se\ кан}, \quad (14)$$

где $V_{se\ кан} = 5 \cdot 10^6 \text{ см/с}$ — дрейфовая скорость насыщения носителей в канале [3],

$$C_{SiO_2} = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_{SiO_2}}{d_{SiO_2}} \text{ — удельная емкость тонкого}$$

подзатворного окисла.

Ток через n -слой истока имеет максимальное значение:

$$I_{с\ макс} = qV_{se} N_{dn} HP, \quad (15)$$

где $V_{se} = 1 \cdot 10^7 \text{ см/с}$ — дрейфовая скорость насыщения носителей в объеме полупроводника [4].

Расчеты показывают, что при $\Pi = 25 \text{ см}$, $\epsilon_{SiO_2} = 3,85$, $d_{SiO_2} = 0,09 \text{ мкм}$, $V_{зи} - V_{пор} = 7 \text{ В}$,

$$V_{зи} - V_{пор} = 7 \text{ В см}^{-3}, H = 2 \text{ мкм}, V_{se} = 0,9 \cdot 10^7 \text{ см/с}, N_{dn} = 3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}:$$

$$I_{скан\ макс} = \Pi C_{SiO_2} (V_{зи} - V_{пор}) V_{se\ кан} = 33,16 \text{ А},$$

$$I_{с\ макс} = qV_{se} N_{dn} HP = 21,6 \text{ А}.$$

Таким образом ток стока при $V_{зи} - V_{пор} = 7 \text{ В}$ ограничивается максимальным током, который может протекать через сопротивление $R_{ст}$ в условиях насыщения дрейфовой скорости электронов ($E_x > 2 \cdot 10^4 \text{ В/см}$).

Легко видеть из (13), что при повышении концентрации доноров в n -слое N_{dn} от $3 \cdot 10^{15}$ до $4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, ток $I_{с\ макс}$ через n -слой достигает значения $I_{с\ макс} = 28,8 \text{ А}$, которое приближается к величине $I_{с\ как\ макс} = 33,16 \text{ А}$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Блихер А. Физика силовых биполярных и полевых транзисторов: Пер. с англ. Под ред. И. В. Грехова. Л.: Энергоатомиздат. Ленинградское отделение. 1986. 248 с.
2. Никишин В.И., Петров Б.К. и др. Проектирование и технология производства мощных СВЧ транзисторов. М.: Радио и связь. 1989. 144 с.
3. Зи С. Физика полупроводниковых приборов: В 2-х кн. М.: Мир. 1984. Кн. 1. 456 с.
4. Зи С. Физика полупроводниковых приборов: В 2-х кн. М.: Мир. 1984. Кн. 2. 456 с.