

Модель МОП транзистора на основе поверхностного потенциала с расширенным температурным диапазоном

Ю.А. Якимов^{1,3}, И.С. Моцев^{1,2}

¹ОАО «НПО «Орион»

²Национальный исследовательский университет «МЭИ»

³Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

Физика работы полупроводниковых приборов при криогенных температурах, как правило, при температуре жидкого азота (77 К) весьма сильно привлекает внимание исследователей за последние несколько десятков лет [1]. ФЧЭ ИК диапазона часто работают при азотном охлаждении. Соответственно схема считывания тоже охлаждается до низких температур. В связи с этим, для проектирования электрической схемы мультиплексора необходимо иметь компактные модели приборов (SPICE-модели) и соответствующие им параметры, актуальные для криогенных температур.

Стандартные модели, такие как PSP, MM, EKV, модели семейства BSIM, и другие, разработаны для проектирования схем при температуре не ниже 200 К, и подразумевают полную ионизацию примесей. При температурах ниже 100 К примесь в канале может быть ионизирована частично, что может быть учтено соответствующей модификацией уравнений ядра модели. В данной работе модель была сформулирована на основе поверхностного потенциала, расчет которого производится с помощью решения уравнения Пуассона [2]. Для этого в уравнение была добавлена зависимость доли ионизированной примеси от температуры и приложенного напряжения.

$$\frac{(V_{GB} - V_{FB} - \psi_s)^2}{\gamma^2} = \quad (1)$$

$$= V_T \left[e^{\frac{-\psi_s}{V_T}} + f(\psi_s) - 1 + e^{\frac{-(2\phi_F + V_{CB})}{V_T}} \left(e^{\frac{\psi_s}{V_T}} - f(\psi_s) - 1 \right) \right],$$

$$f(\psi_s) = \frac{1}{\delta} \ln \left(1 + \delta \left(e^{\frac{\psi_s}{V_T}} - 1 \right) \right) \quad (2)$$

здесь V_{GB} – напряжение затвор-подложка, V_{FB} – напряжение плоских зон, ψ_s – поверхностный потенциал, $\gamma = \sqrt{2q\epsilon_{Si}p_0/C_{ox}'}$ – коэффициент влияния подложки, q – заряд электрона, ϵ_{Si} – относительная диэлектрическая проницаемость кремния, p_0 – равновесная концентрация дырок в объеме, C_{ox}' – удельная ёмкость диэлектрика, V_T – тепловой потенциал, ϕ_F – объемный потенциал, V_{CB} – квазиуровень Ферми электронов, $\delta = N_{A0}^-/N_A$ – степень ионизации примеси в объеме. Зависимость равновесной концентрации дырок и объемного потенциала от температуры вычислялись решением уравнения электронейтральности.

Так как уравнение Пуассона использовалось без упрощений, то для быстрого и точного решения во всех режимах работы транзистора применялся итерационный алгоритм на основе модифицированного метода Ньютона [3]. Ток в канале транзистора находился путём симметричной линеаризации зарядов разложением в ряд Тейлора в точке среднего потенциала [2]. В общем виде при условии постоянной подвижности он выражается в следующей форме:

$$I_{DS} = \frac{W}{L} \mu \int_{\psi_{s0}}^{\psi_{sL}} (-Q'_i) d\psi_s + \frac{W}{L} V_T \mu \int_{Q'_{i0}}^{Q'_{iL}} dQ'_i, \quad (3)$$

$$Q'_i = -C'_{ox} (V_{GB} - V_{FB} - \psi_s) - Q'_B, \quad (4)$$

$$Q'_B(\psi_s) \cong Q'_B(\psi_{sm}) + \left. \frac{\partial Q'_B}{\partial \psi_s} \right|_{\psi_s = \psi_{sm}} \cdot (\psi_s - \psi_{sm}), \quad (5)$$

$$Q'_B(\psi_{sm}) = -C'_{ox} \gamma \sqrt{V_T} \sqrt{e^{\frac{-\psi_{sm}}{V_T}} + f(\psi_{sm}) - 1}, \quad (6)$$

где W – ширина, L – длина, ψ_{s0L} – поверхностный потенциал в начале и конце канала, $\psi_{sm} = 0,5(\psi_{s0} + \psi_{sL})$ – средний потенциал, Q'_i – инверсионный заряд на единицу площади, Q'_B – объёмный заряд на единицу площади.

Точность модели подтверждена сравнением с двумерным численным моделированием ВАХ в TCAD при температуре 77 и 300 К. Параметры транзистора: $t_{ox}=7,2$ нм, $N_A=10^{17}$ см⁻³, $\mu=1260$ см²/Вс (77 К), $\mu=770$ см²/Вс (300 К), влияние поля на подвижность не учитывалось. Аномалии на ВФХ вблизи плоских зон при низкой температуре, получаемые с помощью модели, соответствуют экспериментальным наблюдениям [4].

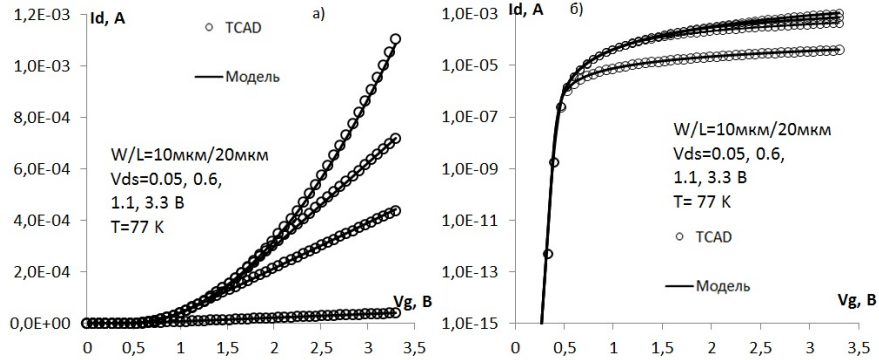


Рис 1. Передаточные характеристики в линейном (а) и логарифмическом масштабе (б)

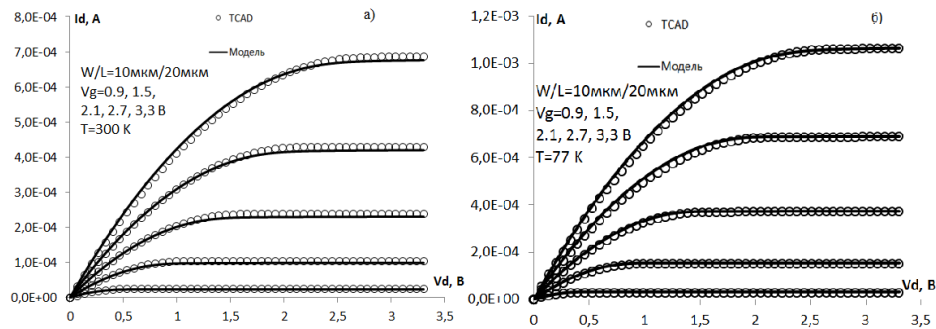


Рис. 2 Выходные ВАХ при T=300 К (а) и T=77 К (б)

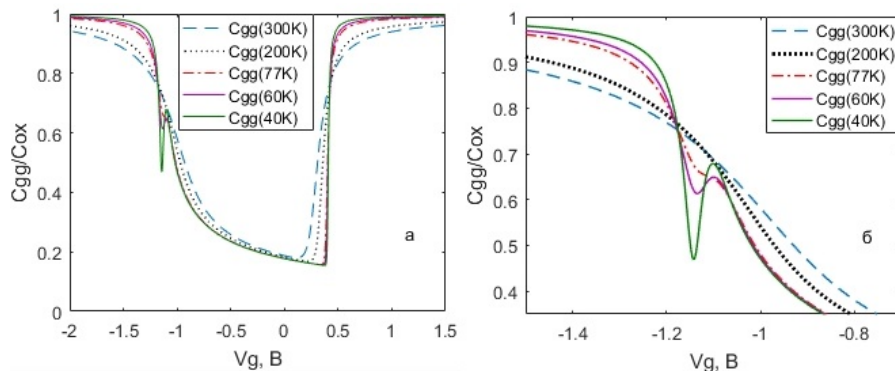


Рис. 3 ВФХ транзистора ($V_{ds}=0$) при разных температурах (а), вблизи напряжения плоских зон (б)

Литература

1. *Balestra F., Ghibaudo G.* Device and Circuit Cryogenic Operation for Low Temperature Electronics. – USA: Springer Science, 2001.
2. *Tsividis Y., McAndrew C.* Operation and Modeling of the MOS Transistor (3rd edition). – USA: Oxford University Press, 2011.
3. *Abbasbandy S.* Improving Newton–Raphson method for nonlinear equations by modified Adomian decomposition method// Applied Mathematics and Computation. – 2003. – N. 145. – P. 887-888.
4. *Gray P., Brown D.* Freeze-out characteristics of the MOS varactor// Applied Physics Letters. – 1968. – V. 13. – N. 8. – P. 247-248.