

ТЕМПЕРАТУРНАЯ МОДЕЛЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТЕНЦИАЛА В ДВУХЗАТВОРНЫХ КНИ КМОП НАНОТРАНЗИСТОРАХ

© 2014 г. Н.В. МАСАЛЬСКИЙ

Научно-исследовательский институт системных исследований РАН, г. Москва
e-mail: volkov@niisi.ras.ru

Введение

Микросхемы на структурах «кремний на изоляторе» (КНИ) имеют обширные приложения во многих отраслях, где их условия эксплуатации отличаются от нормальных [1, 2]. Интерес к двух затворным КНИ транзисторам обусловлен их превосходной возможностью подавления коротко-канальных эффектов (ККЭ), близким к идеальным подпороговым характеристикам и практическим отсутствием кинк-эффекта [3-5].

В данной работе рассматривается модель распределения потенциала по широкому диапазону температуры для архитектуры двух затворного КНИ транзистора «без перекрытия» затвора и стока/истока (см. [5] рис. 1), которые сформированы в виде вытянутых областей. Она является одной из практически значимых из обширного семейства двух затворных транзисторных архитектур [3-5]. В дополнении к существующим преимуществам она имеет еще дополнительные степени свободы для оптимизации подавления ККЭ. В рассматриваемом подходе принято параболическое функциональное распределение потенциала в кремниевой тонкой пленке. Это позволило получить аналитическое решение 2D уравнение Пуассона с соответствующими граничными условиями. Уровень сложности модели определяется требуемой степенью адекватности и практической применимости в пакетах схемотехнического моделирования.

Распределение потенциала: квазидвумерная модель

Для нахождения равновесного распределения потенциала в анализируемой транзисторной структуре рассмотрим квазиклассическую задачу в рамках концепции зарядового разделения [4]. Характеристики тонкопленочных устройств анализируются в мало-сигнальном приближении и приближении «плавного канала»: однородного распределения примесей в его рабочей области. Рассмотрим случай n-канального транзистора. Эти же результаты можно обобщить и для p-канального транзистора. Используя подход зарядового разделения, выделим в рабочей области транзистора заряды, ассоциирующиеся со стоком, истоком, фронтальным затвором, обратным затвором и рабочей областью. При этом в транзисторе должно выполняться условие электронейтральности.

В общем случае необходимо решать самосогласованную задачу, связанную с нахождением распределения потенциала 2D потенциала рабочей области $\varphi(x, y, T)$, где оси x и y выбраны в соответствии с рис 1 [5]. 2D уравнение Пуассона в рабочей области рассматриваемой структуры имеет вид:

$$\frac{\partial^2 \varphi(x, y, T)}{\partial x^2} + \frac{\partial \varphi(x, y, T)}{\partial y^2} = \frac{q}{\epsilon_{Si}} (N_A - N_{SD}^{pick} e^{-\frac{y^2}{\sigma^2}} - N_{SD}^{pick} e^{-\frac{L_g(1+2\eta)-y^2}{\sigma^2}}), \quad (1)$$

где q – заряд электрона, T – температура, ϵ_{Si} – диэлектрическая проницаемость кремния, N_A – концентрация легирования рабочей области, L_g – длина затвора, N_{SD}^{pick} – мак-

симальная концентрация легирования областей стока и истока, $\sigma = \sqrt{2\eta L_g g / \ln 10}$ - параметр, определяющий крутизну гауссова профиля примеси в областях стока и истока вдоль оси y , g – градиент легирования областей стока и истока, η – масштабный фактор, характеризующий отношение длин зазора и затвора $\eta = L_s / L_g$. При этом не учитывается возможный двухмерный характер распределения потенциала в диэлектрическом слое обратного затвора.

Решение уравнения Пуассона аппроксимируется степенным полиномом с коэффициентами, зависящими от y :

$$\varphi(x, y, T) = \sum_{m=0}^N a_m(y, T) x^m. \quad (2)$$

При таком выборе решения необходимо определить функции $a_m(y, T)$ ($m=0,1,2$), которые связаны тремя условиями по координате x . При этом поля связаны с падением напряжения на фронтальном и обратном затворах выражениями:

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial \varphi(x, y, T)}{\partial x} \right|_{x=0} &= \frac{C_f}{\epsilon_{Si}} [\varphi_f(y, T) - U_{Gf} + U_{FB_f}(T)], \\ \left. \frac{\partial \varphi(x, y, T)}{\partial x} \right|_{x=t_{Si}} &= \frac{C_b}{\epsilon_{Si}} [U_{Gb} - U_{FB_b}(T) - \varphi_b(y, T)]. \end{aligned} \quad (3)$$

где $\varphi_f(y, T)$ и $\varphi_b(y, T)$ - распределение потенциала на фронтальной и обратной поверхностях, соответственно, t_{Si} – толщина пленки кремния (рабочей области), U_{Gf} , U_{Gb} – напряжения на фронтальном и обратном затворах, соответственно, C_f , C_d , C_b – емкости фронтального затвора, рабочей области, обратного затвора, соответственно, U_{FB_f} , U_{FB_b} – напряжения плоских зон для фронтального и обратного затворов, соответственно. Как известно, напряжение плоских зон

$U_{FB_f} = \Phi_{MS_f} - (\chi_f + \frac{E_g(T)}{2q} + U_F(T))$, где Φ_{MS_f} - работа выхода фронтального затвора,

χ_f - сродство электрона, $E_g(T)$ - ширина запрещенной зоны, $U_F(T)$ - уровень Ферми. Температурная зависимость ширины запрещенной зоны аппроксимируется эмпирическим соотношением

$E_g(T) = 1.17 - 0.473 \left(\frac{T^2}{1000(T + 683)} \right)$. Температурная зависимость

уровня Ферми следующая $U_F(T) = U_i \ln \frac{N_A}{n_i(T)}$, где $U_i = \frac{kT}{q}$ - тепловой потенциал, k –

константа Больцмана, $n_i(T) = \sqrt{N_c(T)N_v(T)} \exp\left(-\frac{E_g(T)}{2kT}\right)$ - собственная концентрация

носителей, $N_c(T)$ и $N_v(T)$ - плотность поверхностных состояний в зоне проводимости и валентной зоне, соответственно. Температурные зависимости $N_c(T)$ и $N_v(T)$ аппроксимируются следующими эмпирическими выражениями:

$N_{c,v}(T) = \left(\frac{T}{300}\right)^{1.5} N_{c,v}(300)$, где

$N_c(300) = 2.8 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$ и $N_v(300) = 1.04 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$, соответственно.

Граничные условия для уравнения Пуассона (1) имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \varphi_f(0, T) &= u_{bi}(T) \\ \varphi_f(L_{eff}, T) &= u_{bi}(T) + U_{DS} \end{aligned} \quad (4)$$

где $u_{bi}(T) = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_A N_{SD}^{pick} \exp(-(\frac{y}{\sigma})^2) - \exp(-\frac{L_g(1+2\eta) - y^2}{\sigma^2})}{n_i^2(T)}\right)$ – контактная разность потенциалов, U_{DS} – напряжение сток-исток.

Из условий (2)-(3) можно получить уравнения для определения коэффициентов $a_m(y)$. Подставляя решение (2) в уравнение Пуассона (1), и положив в уравнение Пуассона $x = 0$, получим уравнение для потенциала на фронтальной поверхности:

$$\frac{d^2 \varphi_f(y, T)}{dy^2} - \frac{2(C_f + C_b + \frac{C_f C_b}{C_{Si}})}{(C_b + 2C_{Si})t_{Si}^2} \varphi_f(y, T) = A_f(T) \quad (5)$$

где

$$A_f(T) = \frac{q}{\epsilon_{Si}} (N_A - N_{SD}^{pick} (\exp(-(\frac{y}{\sigma})^2) - \exp(-\frac{L_g(1+2\eta) - y^2}{\sigma^2}))) - \frac{C_f(1 + \frac{C_b}{C_{Si}})(U_{Gf} - U_{FBf}(T)) + C_b(U_{Gb} - U_{FBb}(T))}{(C_b + 2C_{Si})t_{Si}^2}$$

В результате получаем выражение для поверхностного потенциала:

$$\varphi_f(y, T) = \frac{(u_{bi}(T) + l^2 A_f(T))(\exp(\frac{L_{eff}}{l}) - 1) - U_{DS}}{2sh(\frac{L_{eff}}{l})} \exp(-\frac{y}{l}) + \frac{U_{DS} - (u_{bi}(T) + l^2 A_f(T))(\exp(-\frac{L_{eff}}{l}) - 1)}{2sh(\frac{L_{eff}}{l})} \exp(\frac{y}{l}) - l^2 A_f \quad (6)$$

где l - характеристическая длина и $l = t_{Si} \sqrt{(1 + 2\frac{C_{Si}}{C_b}) / (2(1 + \frac{C_f}{C_{Si}} + \frac{C_f}{C_b}))}$.

Результаты моделирования

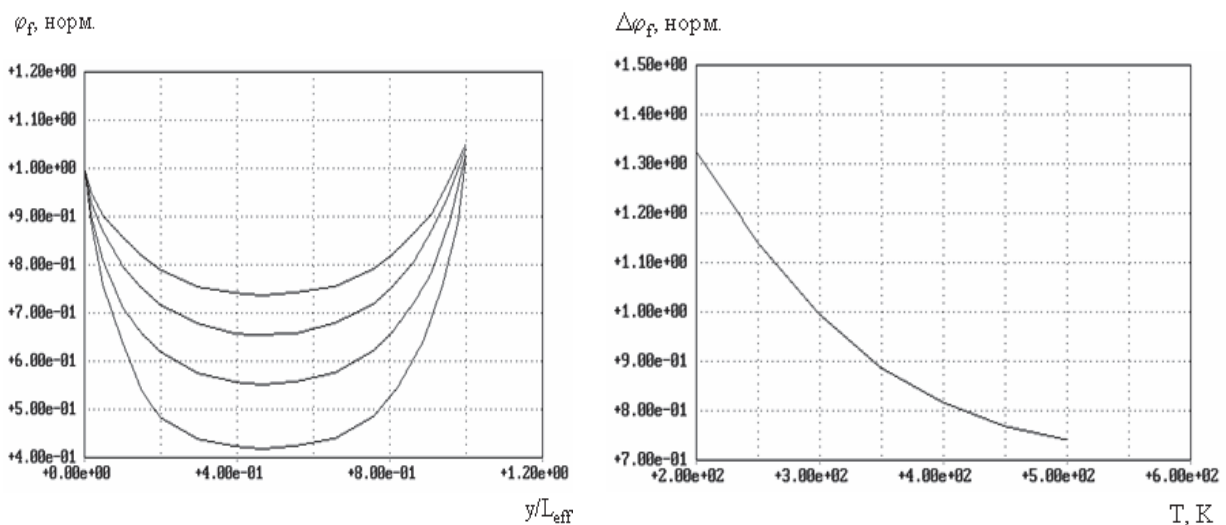


Рис. 1. Результаты моделирования. 1а – (левый) - Распределение фронтального поверхностного потенциала вдоль канала, где самая нижняя кривая $T=200$ К, выше $T=300$ К, далее $T=400$ К и самая верхняя $T=500$ К; 1б - (правый) - Изменение минимума фронтального поверхностного потенциала от температуры.

Для численных экспериментов был выбран прототип двух затворного полностью обедненного КНИ транзистора n-типа с длиной затвора $L_g=32$ нм, $t_{Si}=8$ нм, $t_f=1.6$ нм, $t_b=100$ нм, $L_{eff}=42$ нм, $l=19.5$ нм, $g=3$ нм/дес, $\eta=1$. При помощи соотношений (3-6) для малосигнального случая при $U_{DS}=U_{GF}=0.1$ В вычислены значения фронтального поверхностного потенциала для разных значений температур. Рис. 1а иллюстрирует распределение данного потенциала вдоль длины канала в диапазоне температур от 200 К до 500 К.

Величина фронтального поверхностного потенциала возрастает с ростом температуры во всех точках канала. Это связано с тем, что с повышением температуры увеличивается собственная концентрация носителей, а уровень Ферми понижается. Из результатов моделирования следует, что в исследуемом диапазоне температур зависимость величины изменения потенциала от температуры в любой точке канала носит ярко выраженный нелинейный характер. Рис. 1б иллюстрирует данную зависимость в точке минимума потенциала нормированную относительно температуры 300 К.

Полученные результаты сопоставлялись с расчетами выполненными при помощи программного пакета SILVACO TCAD [6]. В данном конкретном случае отметим хорошее (менее 10%) согласование результатов моделирования.

Заключение

Представлена температурная аналитическая модель распределения потенциала в рабочей области КНИ КМОП нанотранзистора с архитектурой «без перекрытия». Получено хорошее согласование результатов численных расчетов с результатами моделирования выполненными при помощи программного пакета SILVACO TCAD. Предложенная модель может применяться при разработке КНИ нанотранзисторных микросхем для оценки их поведения при различной температуре.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Gharabagi R.* A model for fully depleted double gate SOI CMOS transistors including temperature effects. // Modeling and Simulation of Microsystems. - 2001, № 3, p.490-496.
2. *Goel A.K., Tan T.H.* High temperature and self-heating effects in fully depleted SOI MOSFETs. // Microelectronics Journal. - 2006, v. 37, p. 963-969.
3. *Kranti A., Armstrong G. A.* Engineering source/drain extension regions in nanoscale double gate (DG) SOI MOSFETs: Analytical model and design considerations. // Solid-State Electronics. -2006, v. 50, № 2, p. 437-447.
4. *Масальский Н.В.* Оптимизация параметров двух затворных суб- 20 нм КНИ КМОП транзисторов с архитектурой «без перекрытия». // Микроэлектроника. - 2012, т. 41, № 1, с. 57-64.
5. *Масальский Н.В.* Моделирование КНИ нанотранзисторов с тонкой нелегированной рабочей областью. // «INTERMATIC - 2012» / Материалы Международной НПК, 3-7 декабря 2012 г. Москва. - М.: МИРЭА, 2012, ч. 4, с. 95-98.
6. ATLAS user's manual. SILVACO International. 2006.