УДК 621.382.323 Дата подачи статьи: 04.05.17
DOI: 10.15827/0236-235X.119.359-366 2017. Т. 30. № 3. С. 359–366

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТЕНЦИАЛА В ДВУХЗАТВОРНОМ ПОЛЕВОМ НАНОТРАНЗИСТОРЕ СО СТРУКТУРОЙ КРЕМНИЙ НА ИЗОЛЯТОРЕ С АСИММЕТРИЧНЫМ ЗАТВОРОМ

Н.В. Масальский, к.ф.-м.н., зав. сектором, volkov@niisi.ras.ru
(Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований РАН (ФНЦ НИИСИ РАН), Нахимовский просп., 36, корп. 1, г. Москва, 117218, Россия)

Рассматриваются аналитическая 2D-модель распределения потенциала и вытекающая из нее модель порогового напряжения для тонкопленочного двухзатворного полевого нанотранзистора со структурой кремний на изоляторе с фронтальным затвором из двух последовательно соединенных материалов с разной работой выхода. Исследованы поведение потенциала в транзисторных структурах в области длин затворов менее 50 нм, его зависимости от смещений на стоке для различных конфигураций фронтального затвора.

Полученные результаты однозначно показывают, что применение двух материалов с разной работой выхода во фронтальном затворе приводит к эффективному подавлению короткоканальных эффектов из-за ступенчатой функции в профиле потенциала на границе раздела двух материалов. Сдвиг положения поверхностной позиции минимума поверхностного потенциала незначителен с увеличением смещений стока. Пиковое электрическое поле у стока значительно снижается по сравнению с аналогичной транзисторной структурой, но с однородным фронтальным затвором. Одновременно прогнозируются достижение более высокой активной межэлектродной проводимости и уменьшение подпороговой утечки по сравнению с классическими двухзатворными полевыми нанотранзисторами со структурой кремний на изоляторе в области длин затворов менее 50 нм.

Отличительными свойствами исследуемых структур являются существенное снижение пика электрического поля на границе рабочая область–сток, уменьшение паразитных эффектов порогового напряжения. Результаты моделирования хорошо согласуются с данными вычислительного эксперимента, полученными при помощи коммерчески доступного программного пакета ATLAS, предназначенного для моделирования сложных транзисторных структур.

Таким образом, применение двух материалов с разной работой выхода во фронтальном затворе двухзатворных полевых нанотранзисторов со структурой кремний на изоляторе улучшает их ключевые электрофизические характеристики по сравнению с двухзатворными полевыми транзисторами с однородным фронтальным затвором и с объемными аналогами.

***Ключевые слова**: двухзатворный КНИ КМОП-нанотранзистор, 2D-уравнение Пуассона, асимметричный фронтальный затвор, распределение потенциала, пороговое напряжение.*

Двухзатворные полевые транзисторы со структурой *кремний на изоляторе* (КНИ) являются очень перспективной архитектурой для физически предельного масштабирования КНИ КМОП-нанотехнологии (*комплементарная логика на транзисторах металл-оксид-полупроводник*) в основном из-за их относительной простоты и технологичности [1]. Они также отличаются расширенной возможностью оптимизации электрофизических параметров, повышенной устойчивостью к деградационным эффектам, высокой активной межэлектродной проводимостью – это превосходные опции для продолжения углубленных теоретических и экспериментальных исследований устройств с такой архитектурой [2–5]. Одной из значимых конструкций являются асимметричные двухзатворные КНИ КМОП-нанотранзисторы. Они популярны, так как обеспечивают возможность управления пороговым напряжением в отличие от симметричных двухзатворных КНИ КМОП-транзисторов [5–10].

Повысить эффективность подавления *короткоканальных эффектов* (ККЭ) призвана новая транзисторная структура – двухзатворный КНИ КМОП-транзистор с асимметричным затвором [1, 5, 11, 12]. В данной структуре фронтальный затвор состоит из двух последовательно соединенных материалов M1 и M2 с различными работами выхода. Такая конфигурация из-за скачка потенциала на границе соприкосновения двух материалов будет обеспечивать одновременное увеличение активной межэлектродной проводимости и подавление ККЭ по сравнению с двухзатворным КНИ КМОП-транзистором с затвором из одного материала. Предположительно, в рассматриваемой структуре пик электрического поля на краю рабочей области у стока будет уменьшаться, что влечет рост усредненного электрического поля под затвором. Это положительно сказывается на подвижности носителей [4], обусловливает минимизацию возможности влияния локализованных зарядов на проводимость транзистора [13], увеличивает эффективность управления при помощи затвора общей проводимостью транзистора. Ступенчатый профиль распределения поверхностного потенциала гарантирует экранирование области канала под материалом M1 со стороны истока от изменения потенциала на стоке [5, 12]. После достижения транзистором режима насыщения область под материалом M2 поглощает любое дополнительное напряжение сток–исток и, следовательно, область под M1 скрыта от возможных изменений потенциала на стоке [2, 3, 9].

Цель данной работы в том, чтобы создать аналитическую 2D-модель двухзатворного КНИ КМОП-нанотранзистора с фронтальным затвором, состоящим из двух последовательно соединенных материалов M1 и M2 с различными работами выхода, на основе аналитического решения двухмерного уравнения Пуассона. На основании разработанной аналитической модели для распределения поверхностного потенциала сформулировать аналитическую модель порогового напряжения. Для исследования специфики поведения потенциала в структурах в области длин затворов менее 50 нм численно исследованы его зависимости от смещений на стоке для различных конфигураций фронтального затвора. Результаты моделирования хорошо согласуются с данными вычислительного эксперимента, полученными при помощи коммерчески доступного программного пакета ATLAS, предназначенного для моделирования сложных транзисторных структур [14]. Одновременно предсказаны достижение более высокой активной межэлектродной проводимости и уменьшение подпороговой утечки по сравнению с классическими двухзатворными КНИ КМОП-нанотранзисторами в области длин затворов менее 50 нм. Отличительными свойствами исследуемых структур являются существенное снижение пика электрического поля на границе рабочая область–сток, уменьшение эффекта roll-off (резкого спада) порогового напряжения и DIBL-эффекта.

Прототип устройства и постановка задачи

Функциональная схема двухзатворного КНИ КМОП-транзистора с фронтальным затвором, выполненным из двух разных материалов, приведена на рисунке 1. Фронтальный затвор состоит из двух соединенных материалов M1 (p(+)-поликремния) и M2 (n(+)-поликремния) с длиной L_I и L_{II} соответственно. При этом выполняется условие $L_I + L_{II} = L_g$, где L_g – длина затвора (или длина рабочей области). Обратный (нижний) затвор выполнен из n(+)-поликремния.

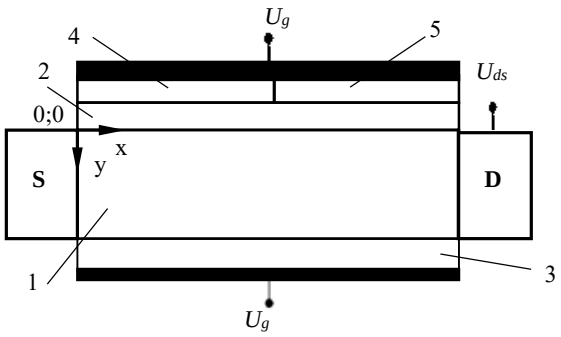


Рис. 1. Схема двухзатворного КНИ КМОП-транзистора с фронтальным затвором из двух материалов: 1 – кремниевая рабочая область, 2 – подзатворный окисел фронтального затора, 3 – подзатворный окисел обратного затора, 4 – часть фронтального затвора M1, 5 – часть фронтального затвора M2

Fig. 1. The scheme of dual-gate SOI CMOS transistor with double-material front gate

Рассмотрим квазиклассическую задачу (в *приближении зарядового разделения* (ПЗР)) нахождения равновесного распределения потенциала в рассматриваемой КНИ-структуре [15]. Отметим, что возможность использования приближения ПЗР означает также и выбор начала отсчета потенциала φ. В общем случае необходимо решать самосогласованную задачу, связанную с нахождением распределения потенциала $\varphi(x, y)$, которое будет влиять и на распределение зарядов в рабочей области транзистора. Полагая, что концентрация легирования рабочей области транзистора постоянна по всему ее объему, и пренебрегая влиянием фиксированных окисных зарядов на электростатику канала, распределение потенциала в кремниевой тонкой рабочей области в режиме слабой инверсии может быть записано в виде 2D-уравнения Пуассона:

$$\frac{\partial^2\varphi(x,y)}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\varphi(x,y)}{\partial y^2}=\frac{qN_A}{\varepsilon_S}, \qquad (1)$$

где q – заряд электрона; $\varphi(x, y)$ – потенциал в рабочей области транзистора; ε_S – диэлектрическая проницаемость рабочей области; N_A – концентрация легирования рабочей области [7].

Для решения (1) используются следующие граничные условия:

$$\begin{aligned}
&\varphi(x)\big|_{y=0}=\varphi_f(x),\\
&\frac{\varepsilon_{ox}}{t_{ox}}(U_g-U_{FB}-\varphi(x))=-\varepsilon_S\frac{\partial\varphi(x,y)}{\partial y}\Big|_{y=0},\\
&\frac{\varepsilon_{ox}}{t_{ox}}(U_g-U_{FB}-\varphi(x,t_s))=-\varepsilon_S\frac{\partial\varphi(x,y)}{\partial x}\Big|_{y=t_S}, \qquad (2)\\
&\varphi(0,y)=U_{bi},\\
&\varphi(L_g,y)=U_{bi}+U_{ds},
\end{aligned}$$

где $\varphi_f(x)$ – поверхностный потенциал; ε_{ox} – диэлектрическая проницаемость подзатворного окисла; t_{ox} – толщина подзатворного окисла; U_g – напряжение на затворах; U_{FB} – напряжение плоских зон; U_{bi} – встроенная разность потенциалов; t_s – толщина рабочей области транзистора; U_{ds} – напряжение сток–исток.

Распределение потенциала в вертикальном направлении, то есть его y-зависимость, может быть аппроксимировано следующей параболической функцией, обоснование которой для полностью обедненных КНИ КМОП-транзисторов можно представить так:

$$\varphi(x,y)=\sum_{m=0}^{N}a_m(x)y^m, \qquad (3)$$

где $a_m(x)$ – произвольные коэффициенты, зависящие только от x [6].

Метод решения

Поскольку в рассматриваемой транзисторной структуре фронтальный затвор состоит из двух различных материалов с разными работами выхода, фронтальные напряжения плоских зон для областей I и II (см. рис. 1) на фронтальном затворе будут различными, их можно представить в виде

$$U_{FB_I} = \Phi_{MS_I} - (\chi_{Si} + \frac{E_g}{2q} + \varphi_F)$$

$$\text{и } U_{FB_II} = \Phi_{MS_II} - (\chi_{Si} + \frac{E_g}{2q} + \varphi_F), \quad (4)$$

где χ_{Si} – сродство электрона в кремнии; E_g – запрещенная зона кремния при 300 K; φ_F – уровень Ферми, где $\varphi_F = \varphi_t \ln\frac{N_A}{n_i}$ ($\varphi_t = \frac{kT}{q}$ – тепловой потенциал; T – температура; k – константа Больцмана; n_i – собственная концентрация носителей).

Так как на фронтальном затворе есть две области, распределение потенциала для каждой может быть записано аналогично (3) в виде

$$\varphi^{(I)}(x,y) = a_0^{(I)}(x) + a_1^{(I)}(x)y + a_2^{(I)}(x)y^2$$

$$\text{при } 0 \le x \le L_I \text{ и } 0 \le y \le t_S, \quad (5)$$

$$\varphi^{(II)}(x,y) = a_0^{(II)}(x) + a_1^{(II)}(x)y + a_2^{(II)}(x)y^2$$

$$\text{при } L_I \le x \le L_g \text{ и } 0 \le y \le t_S, \quad (6)$$

где $\varphi^{(I)}(x,y)$ и $\varphi^{(II)}(x,y)$ – потенциал под областями I и II соответственно и коэффициенты $a_i^{(j)}(x)$ – произвольные функции, где i = 0, 1, 2 и j = I, II.

Уравнение Пуассона решается раздельно для двух областей фронтального затвора с использованием следующих граничных условий.

1. Электрическое поле на границе фронтальный затвор–окисел непрерывно для обеих областей:

$$\frac{\varepsilon_{ox}}{t_f}(U_g - U_{FB}^{(I)} - \varphi_f^{(I)}(x)) = -\varepsilon_S \frac{\partial\varphi^{(I)}(x,y)}{\partial x}\Big|_{y=0},$$

$$\frac{\varepsilon_{ox}}{t_f}(U_g - U_{FB}^{(I)} - \varphi_f^{(II)}(x)) = -\varepsilon_S \frac{\partial\varphi^{(II)}(x,y)}{\partial x}\Big|_{y=0}, \quad (7)$$

где $\varphi_f^{(I)}(x)$ и $\varphi_f^{(II)}(x)$ – поверхностный потенциал под областями I и II соответственно; t_f – толщина подзатворного окисла фронтального затвора.

2. Электрическое поле на границе обратный затвор–оксид и обратный канал непрерывно для обоих материалов на фронтальном затворе:

$$\frac{\varepsilon_{ox}}{t_b}(U_g - U_{FBb} - \varphi(x,t_S)) = -\varepsilon_S \frac{\partial\varphi^{(I)}(x,y)}{\partial x}\Big|_{y=t_S},$$

$$\frac{\varepsilon_{ox}}{t_b}(U_g - U_{FBb} - \varphi(x,t_S)) = -\varepsilon_S \frac{\partial\varphi^{(II)}(x,y)}{\partial x}\Big|_{y=t_S}, \quad (8)$$

где t_b – толщина подзатворного окисла обратного затвора; U_{FBb} – напряжение плоских зон на обратном затворе, такое же, что и на фронтальном для области II.

3. Поверхностный потенциал на поверхности двух разнородных материалов затвора на фронтальном затворе непрерывный:

$$\varphi^{(I)}(L_1,0) = \varphi^{(II)}(L_1,0). \quad (9)$$

4. Электрическое поле на поверхности двух материалов фронтального затвора непрерывно:

$$\frac{\partial\varphi^{(I)}(x,y)}{\partial x}\Big|_{x=L_1} = \frac{\partial\varphi^{(II)}(x,y)}{\partial x}\Big|_{x-L_1}. \quad (10)$$

5. Потенциал на краю рабочей области со стороны истока:

$$\varphi^{(I)}(0,y) = U_{bi}, \quad (11)$$

где $U_{bi} = \varphi_t \ln(\frac{N_A N_{ds}}{n_i^2})$ – контактная разность потенциалов из-за разности концентраций легирования рабочей области и областей стока и истока, где N_{ds} – концентрация легирования области стока и истока.

6. Потенциал на краю рабочей области со стороны стока:

$$\varphi^{(II)}(L_g,y) = U_{bi} + U_{ds}, \quad (12)$$

где U_{ds} – приложенное напряжение между стоком и истоком (напряжение питания).

Выражения для коэффициентов в (5) и (6) определяются подстановкой решений (5)–(6) в (1); используя граничные условия (7)–(12), их можно записать в виде

$$a_0^{(j)}(x) = \varphi_f^{(j)}(x),$$

$$a_1^{(j)}(x) = \frac{C_f}{\varepsilon_S}(\varphi_f^{(j)}(x) - U_g + U_{FB}^{(j)}), \quad (13)$$

$$a_0^{(j)}(x) + a_1^{(j)}(x)t_S + a_2^{(j)}(x)t_S^2 = \varphi_b(x),$$

где $C_f = \frac{\varepsilon_{ox}}{t_f}$ – емкость фронтального затвора, j = I, II.

Дифференцируя решение (3) по y с учетом (13), получаем выражение для $a_2(x)$:

$$a_2^{(j)}(x) = \frac{-(C_f + C_b + \frac{C_f C_b}{C_S})\varphi_f^{(j)}(x)}{(C_b + 2C_S)t_S^2} + \frac{C_f(1+\frac{C_b}{C_S})(U_g - U_{FB}^{(j)}) + C_b(U_g - U_{FB}^{(II)})}{(C_b + 2C_S)t_S^2}, \quad (14)$$

где $C_f = \frac{\varepsilon_S}{t_S}$ – емкость рабочей области; $C_b = \frac{\varepsilon_{ox}}{t_b}$ – емкость обратного затвора, j = I, II.

Для определения поверхностного потенциала необходимо решить уравнение Пуассона на границе Si–SiO_2, которое можно представить, например, для области I в виде

$$\frac{d^2\varphi_f^{(I)}(x)}{dx^2} - \alpha\varphi_f^{(I)}(x) = \varphi_0^{(I)}, \quad (15)$$

где $\alpha = 2\dfrac{(1-\dfrac{C_f}{C_S}+\dfrac{C_f}{C_b})}{t_S^2(1+2\dfrac{C_S}{C_b})}$,

$$\varphi_0^{(I)} = \frac{qN_A}{\varepsilon_S} - 2\frac{(U_g - U_{FB}^{(I)})(\dfrac{C_f}{C_b}+\dfrac{C_f}{C_S})}{t_S(1+2\dfrac{C_S}{C_b})} - 2\frac{U_g - U_{FB}^{(II)}}{t_S^2(1+2\dfrac{C_S}{C_b})}.$$

Решением данного уравнения может быть следующее выражение:

$$\varphi_f^{(I)} = A_1^{(I)}\exp(y/l) + A_2^{(I)}\exp(-y/l) - l^2\varphi_0^{(I)}, \quad (16)$$

где l – характеристическая длина $l = \dfrac{1}{\sqrt{\alpha}}$,

$$A_1^{(I)} = ((U_{bi} + U_{ds} - l^2\varphi_0^{(II)}) - (U_{bi} - l^2\varphi_0^{(I)})\exp(-\frac{L_g}{l}) -$$

$$-l^2(\varphi_0^{(I)} - \varphi_0^{(II)})\cosh(\frac{L_{II}}{l}))\frac{\exp(-\dfrac{L_g}{l})}{(1-\exp(-2\dfrac{L_g}{l}))},$$

$$A_2^{(I)} = ((U_{bi} - l^2\varphi_0^{(I)}) - (U_{bi} + U_{ds} - l^2\varphi_0^{(II)})\exp(-\frac{L_g}{l}) +$$

$$+l^2(\varphi_0^{(I)} - \varphi_0^{(II)})\cosh(\frac{L_{II}}{l}))\frac{\exp(-\dfrac{L_g}{l})}{(1-\exp(-2\dfrac{L_g}{l}))}.$$

Для области II уравнение Пуассона можно представить в виде

$$\frac{d^2\varphi_f^{(II)}(x)}{dx^2} - \alpha\varphi^{(II)}(x) = \varphi_0^{(II)}, \quad (17)$$

где $\varphi_0^{(II)} = \dfrac{qN_A}{\varepsilon_S} - 2\dfrac{(U_g - U_{FB}^{(II)})(\dfrac{C_f}{C_b}+\dfrac{C_f}{C_S})}{t_S(1+2\dfrac{C_S}{C_b})} -$

$$-2\frac{U_g - U_{FB}^{(II)}}{t_S^2(1+2\dfrac{C_S}{C_b})}.$$

Решение уравнения (17) по аналогии с (16) можно представить в виде

$$\varphi_f^{(II)} = A_1^{(II)}\exp(y/l) + A_2^{(II)}\exp(-y/l) - l^2\varphi_0^{(II)}, \quad (18)$$

где $A_1^{(II)} = A_1^{(I)}\exp(\dfrac{L_I}{l}) + \dfrac{l^2}{2}(\varphi_0^{(I)} - \varphi_0^{(II)})$,

$$A_2^{(II)} = A_2^{(I)}\exp(-\frac{L_I}{l}) + \frac{l^2}{2}(\varphi_0^{(I)} - \varphi_0^{(II)}).$$

Пороговое напряжение

В квазиклассическом приближении пороговое напряжение U_{th} двухзатворного КНИ КМОП-транзистора соответствует такому затворному напряжению, при котором сумма электронной плотности на фронтальной и обратной поверхностях равняется пиковой плотности легирования рабочей области [7]. В общем случае аналитическое выражение для U_{th} вытекает из выражения для минимального значения фронтального поверхностного потенциала [9–11]. Для рассматриваемой нанотранзисторной структуры можно сделать некоторые упрощения с учетом симметричности структуры и одинакового напряжения U_g, приложенного к затворам. Тогда выражение U_{th} в длинноканальном случае для исследуемой структуры основывается на известной зависимости распределения потенциала от напряжения на затворах транзистора. В пороговом режиме первоначально инверсионный слой сформирован на внутренней поверхности обратного затвора n+ поликристаллического кремния. Распределение потенциала тогда изменяется линейно, в то время как фронтальный поверхностный потенциал фиксирован. После этого инверсионный слой на внутренней поверхности фронтального p+ поликристаллического кремния сформирован, распределение потенциала в рабочей области стабилизируется и поддерживается напряжением, приложенным к обоим затворам [9]. В рассматриваемой нанотранзисторной структуре в общем случае параметры t_f и t_b для фронтального и обратного затворов, которые являются толщинами подзатворного окисла, могут быть различными. Это приводит к тому, что данная структура характеризуется двумя различными пороговыми напряжениями, которые связаны с фронтальным и обратным затворами соответственно [5]. Опираясь на изложенное приближение, выражение для порогового напряжения на фронтальном и обратном затворах в длинноканальном случае имеет вид

$$U_{th_b} = U_{FB}^{(I)} + 2\varphi_F + \frac{Q_S}{2}(1+\varphi_t\frac{4C_S}{Q_S})(\frac{1}{4C_S}+\frac{1}{C_f}) +$$

$$+\varphi_t\ln(\varphi_t\frac{4C_S}{Q_S}) - \frac{\varepsilon_r t_f + t_S}{\varepsilon_r(t_f+t_b)+t_S}\Delta U_{FB},$$

$$U_{th_f} = U_{FB}^{(I)} + 2\varphi_F +$$

$$+\frac{Q_S}{2}\left(1+\varphi_t\frac{4C_S}{Q_S}\right)\left(\frac{1}{4C_S}+\frac{1}{C_f}\right) + \varphi_t\ln\left(\varphi_t\frac{4C_S}{Q_S}\right), \quad (19)$$

где U_{th_b} – пороговое напряжение для обратного затвора; U_{th_f} – пороговое напряжение для фронтального затвора; $Q_S = qN_At_S$ – примесный (акцепторный) заряд рабочей области; $\varepsilon_r = \dfrac{\varepsilon_S}{\varepsilon_{ox}}$ – отношение диэлектрических проницаемостей; $\Delta U_{FB} = U_{FB}^{(I)} - U_{FB}^{(II)}$ – разница между напряжениями плоских зон.

В длинноканальном случае примесный заряд Q_S играет заметную роль в поведении порогового напряжения [7]. Варьируя уровень легирования рабочей области, можно в некоторой степени управлять величиной порогового напряжения. Однако

для тонкопленочных короткоканальных устройств влиянием данного заряда на пороговые напряжения можно пренебречь [10]. Для КНИ КМОП-нанотранзисторов с низколегированной рабочей областью это приближение приводит к следующему уравнению Пуассона:

$$\frac{\partial^2 \varphi(x,y)}{\partial x^2} + \frac{\partial \varphi(x,y)}{\partial y^2} \approx 0 . \quad (20)$$

Для решения (20) используются параболическое приближение для распределения потенциала, аналогичное выражениям (5) и (6), и граничные условия (7)–(12). Сдвиг порогового напряжения из-за ККЭ для двухзатворного КНИ КМОП-нанотранзистора с составным фронтальным затвором по аналогии с [9] можно представить так:

$$\Delta U_{th} = 2\sqrt{u_0 u_1}\exp\left(-\frac{L_I}{\sqrt{2\varepsilon_r t_S t_f}}\right), \quad (21)$$

где $u_0 = U_{bi} - U_g - U_{FB}^{(I)} + \dfrac{\Delta U_{FB}}{2\left(1+\dfrac{t_S}{2\varepsilon_r t_f}\right)}$,

$$u_1 = \frac{1}{2}\frac{(U_{bi} + U_{ds} - U_g - U_{FB}^{(II)})\sinh(\frac{L_1}{l}) + u_0 \sinh(\frac{L_2}{l})}{\cosh(\frac{L_1}{l})\sinh(\frac{L_2}{l}) + \sinh(\frac{L_1}{l})\cosh(\frac{L_2}{l})} .$$

Тогда в общем случае выражение для порогового напряжения двухзатворного КНИ КМОП-нанотранзистора с составным фронтальным затвором имеет следующий вид:

$$U_{th} = U_{th_long} - U_{th}, \quad (22)$$

где U_{th_long} может быть или U_{th1}, или U_{th2}. Уравнение (22) применимо не во всех случаях. Простой вид поправки порогового напряжения обусловлен предположением, что L_I и L_{II} несильно различаются. При значительном отличии значений L_I и L_{II} искажается связь между фронтальным и обратными затворами, что приводит к нивелированию эффекта roll-off порогового напряжения. С учетом этого мы вводим поправочный коэффициент, эмпирическое выражение для которого является обобщением результатов большого числа расчетов, выполненных при помощи программы ATLAS:

$$\theta = 1 - \frac{|L_I - L_{II}|}{\rho L_I}, \quad (23)$$

где ρ – подгоночный параметр, который зависит от отношения L_I и L_{II} и общей длины рабочей области. Нужно отметить, что, если $L_I = L_{II}$, то θ = 1. При уменьшении длины рабочей области и постоянном отношении L_I и L_{II} эффект roll-off порогового напряжения проявляется, хотя менее выражено, чем в случае классического двухзатворного КНИ КМОП-транзистора. Существенные отличия в пороговом напряжении начинают возникать примерно в субдиапазоне длин рабочей области 50 нм при отношении L_I и L_{II} 3:1 (или 1:3). Очевидно, что такие топологии вряд ли представляют практический интерес в силу незначительного влияния на характеристики нанотранзисторных структур. Поэтому заключительное выражение для U_{th} имеет вид

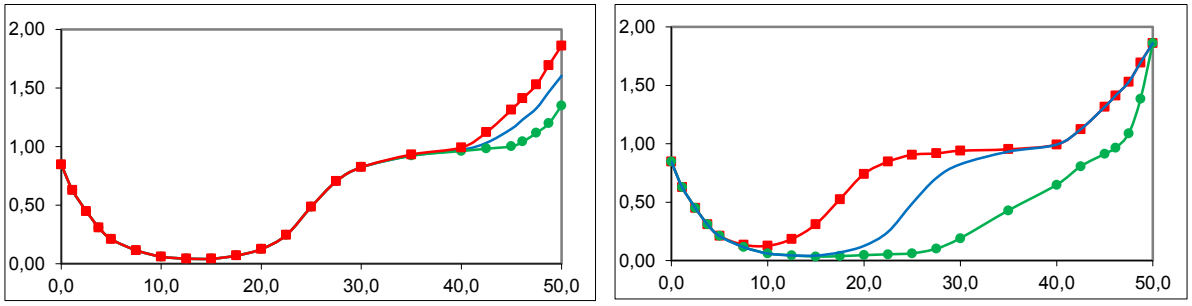
$$U_{th} = U_{th_long} - \theta\Delta U_{th}. \quad (24)$$

Результаты моделирования

Для модельных расчетов выбран прототип двухзатворного полностью обедненного КНИ КМОП-нанотранзистора с фронтальным затвором из двух материалов с разной работой выхода (фронтальный затвор для формирования областей I и II с работой выхода 4,17 эВ и 5,25 эВ соответственно). Технологические параметры транзистора, отвечающие современным требованиям, таковы: L_g = 50 нм, t_S = 10 нм, t_f = 2,0 нм, t_b = 2,0 нм, $N_A = 1\times10^{17}$ см$^{-3}$, $N_{ds} = 5\times10^{20}$ см$^{-3}$.

На рисунке 2а приведены результаты моделирования распределения фронтального поверхностного потенциала вдоль рабочей области двухзатворного полностью обедненного КНИ КМОП-нанотранзистора с фронтальным затвором из двух материалов с разной работой выхода. Длины областей с разной работой выхода равны и составляют половину общей длины рабочей области. Следует отметить, что поверхностный потенциал в центре на границе контакта двух областей представляет ступенчатую функцию на поверхности. Из-за этой ступенчатой функции область с большей работой выхода (область M1) фронтального затвора скрыта от изменений потенциала на стоке. Таким образом, ступенчатая функция подавляет влияние электрического поля, вызванного потенциалом между истоком и стоком (напряжением питания) в области M1, и, следовательно, нет никакого существенного изменения в поверхностном потенциале под M1 при увеличении смещения стока. Это означает, что напряжение на стоке имеет очень незначительное влияние на ток стока после насыщения [10], который, в свою очередь, значительно уменьшает проводимость стока и эффект DIBL для двухзатворного полностью обедненного КНИ КМОП-нанотранзистора с фронтальным затвором из двух материалов с разной работой выхода.

На рисунке 2б приведены результаты расчетов распределения фронтального поверхностного потенциала вдоль рабочей области для различных комбинаций длин L_I и L_{II}. Из представленных результатов следует, что во втором случае нет никакого изменения в поверхностном потенциале, но в первом случае положение минимума поверхностного потенциала, лежащего под M1, смещается к истоку, так как параметр L_I уменьшается. Это вынуждает пик электрического поля в рабочей области смещаться больше к истоку. Однако характерный вид электрического поля остается неизменным. Кроме того, минимумы поверхностного



а) *б)*

Рис. 2. Распределения фронтального поверхностного потенциала вдоль рабочей области: а) при разных напряжениях питания, где 1 – U_{ds} = 1 В, 2 – U_{ds} = 0,75 В, 3 – U_{ds} = 0,5 В; б) при разных отношениях L_I и L_{II}, где 1 – L_I: L_{II} = 1:2, 2 – L_I: L_{II} = 1:1, 3 – L_I: L_{II} = 2:1

Fig. 2. Front surface potential distribution along the workspace

потенциала для этих трех случаев различаются. Это происходит потому, что, поскольку L_I увеличивается, часть рабочей области, которой управляет фронтальный затвор с большей работой выхода, тоже увеличивается.

На рисунке 3 представлены результаты расчетов напряженности электрического поля вдоль рабочей области двухзатворных КНИ КМОП-нанотранзисторов с разным типом фронтального затвора: с однородным и асимметричным. Природа электрического поля для двух транзисторов одинаковая. Ближе к стоку напряженность поля резко возрастает. Так, на последних десяти процентах длины оно возрастает в два раза. Тем не менее, как видно из рисунка, пиковое электрическое поле у края рабочей области со стороны стока транзистора с асимметричным затвором значительно меньше (практически в 2,5 раза), чем для транзистора с однородным затвором, из-за использования материала затвора с более низкой работой выхода, чем материал затвора у истока. Из-за скачка поверхностного потенциала двухзатворного КНИ КМОП-нанотранзистора с фронтальным затвором,

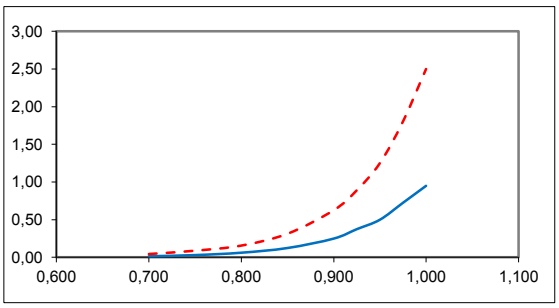


Рис. 3. Распределение электрического поля вдоль рабочей области у стока при Ug = 0,1 В, Uds = 0,5 В, где 1 – двухзатворный КНИ КМОП-нанотранзистор с фронтальным затвором с двумя материалами с разной работой выхода и L_I=L_{II}, 2 – обычный симметричный двухзатворный КНИ КМОП-нанотранзистор

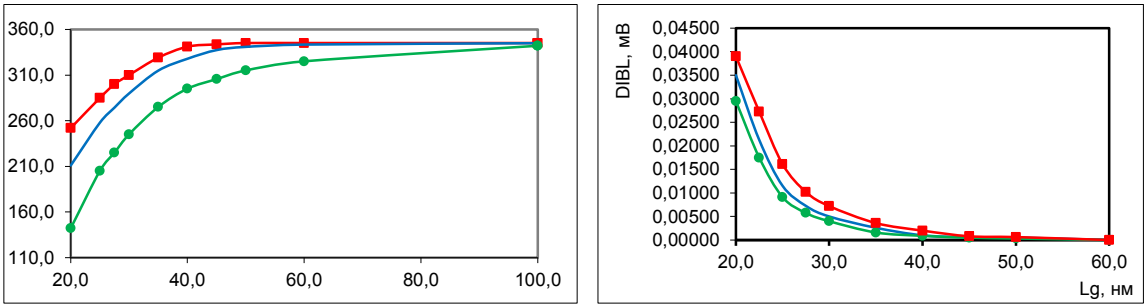
Fig. 3. Electrical field distribution along the drain workspace when Ug = 0,1 В, Uds = 0,5 В

состоящим из двух материалов с разной работой выхода, пиковое электрическое поле стороны стока существенно снижается, что позволяет достигать одновременного подавления как короткоканальных эффектов, так и эффекта горячих носителей [12].

Зависимость порогового напряжения от длины затвора для двухзатворного КНИ КМОП-нанотранзистора с асимметричным фронтальным затвором для различных соотношений L_I/L_{II} показана на рисунке 4а. Следует отметить, что ККЭ во всех случаях являются серьезным препятствием при масштабировании длины рабочей области. Наиболее сильно это проявляется для случая L_I:L_{II} = 1:2, когда влияние области M1 на распределение потенциала несущественно, что отражено на рисунке 3 (нижняя кривая). С увеличением протяженности области M1 влияние эффекта roll-off уменьшается. Зависимость $Uth(Lg)$ сглаживается. В предельном случае отклонение порогового напряжения составляет 82 мВ и 61 мВ для отношения L_I:L_{II} = 1:1 и L_I:L_{II} = 2:1 соответственно.

На рисунке 4б приведены результаты моделирования зависимости DIBL-эффекта от длины рабочей области исследуемого прототипа при разных отношениях L_I:L_{II}. Величина DIBL вычисляется как разность между пороговым напряжением при высоком напряжении сток–исток ($U_{ds}^{(h)}$ = 0,5 В) и пороговым напряжением при низком напряжении сток–исток ($U_{ds}^{(l)}$ = 0,05 В). Исходя из соотношений (21) и (24) выражение для DIBL можно записать в виде $DIBL = 2\theta(\sqrt{u_0(U_{ds}^{(h)})u_1(U_{ds}^{(h)})} - \sqrt{u_0(U_{ds}^{(l)})u_1(U_{ds}^{(l)})})\exp(-\frac{L_I}{\sqrt{2\varepsilon_r t_S t_f}})$.

Из результатов моделирования следует, что величина DIBL резко возрастает при масштабировании длины рабочей области начиная примерно с 40 нм. При этом отношение длин областей L_I и L_{II} оказывает влияние на величину параметра DIBL. Уменьшение длины области II с меньшей работой



а) *б)*

Рис. 4. Зависимости: а) Uth и б) DIBL эффекта от длины затвора Lg, где 1 – $L_I = L_{II}$, 2 – L_I:L_{II} = 2:1, 3 – L_I:L_{II} = 1:2

Fig. 4. Dependencies: a) Uth and б) DIBL effect on a gate length Lg

выхода приводит к снижению экранировки стока и, как следствие, к росту величины DIBL, а также сказывается на управляемости и активной межэлектродной проводимости транзисторной структуры. В то же время при больших длинах рабочей области эффект DIBL незначительный при любых отношениях L_I и L_{II}.

Заключение

Разработаны 2D-аналитическая модель распределения потенциала и вытекающая из нее модель порогового напряжения для тонкопленочного двухзатворного КНИ КМОП-нанотранзистора с фронтальным затвором из двух последовательно соединенных материалов с разной работой выхода. Исследованы поведение потенциала в транзисторных структурах в области длин затворов менее 50 нм, его зависимости от смещений на стоке для различных конфигураций фронтального затвора. Полученные результаты однозначно показывают, что применение двух материалов с разной работой выхода во фронтальном затворе приводит к эффективному подавлению короткоканальных эффектов из-за ступенчатой функции в профиле потенциала на границе раздела двух материалов. Сдвиг положения поверхностной позиции минимума поверхностного потенциала незначителен с увеличением смещений стока. Пиковое электрическое поле у стока значительно снижается по сравнению с аналогичной транзисторной структурой, но с однородным фронтальным затвором. Предсказаны достижение более высокой активной межэлектродной проводимости и уменьшение подпороговой утечки по сравнению с классическими двухзатворными КНИ КМОП-нанотранзисторами в области длин затворов менее 50 нм. Отличительными свойствами исследуемых структур являются существенное снижением пика электрического поля на границе рабочей области и стока, уменьшение эффекта roll-off (резкого спада) порогового напряжения и DIBL-эффекта. Результаты моделирования хорошо согласуются с данными вычислительного эксперимента, которые получены при помощи коммерчески доступного программного пакета ATLAS, предназначенного для моделирования сложных транзисторных структур. Таким образом, применение двух материалов с разной работой выхода во фронтальном затворе двухзатворных КНИ КМОП-нанотранзисторов улучшает их ключевые электрофизические характеристики по сравнению с двухзатворными полевыми транзисторами с однородным фронтальным затвором и с объемными аналогами.

Литература

1. International technology roadmap for semiconductor 2014 edition. URL: http://public.itrs.net/ (дата обращения: 17.11.2016).
2. Djeffal F., Meguellati M., Benhaya A. A two-dimensional analytical analysis of subthreshold behavior to study the scaling capability of nanoscale graded channel gate stack DG MOSFETs. Physica E, 2009, vol. 41, no. 8, pp. 1872–1879.
3. Monga U., Fjeldly T.A. Compact subthreshold current modeling of short-channel nanoscale double-gate MOSFET. IEEE Trans. Electron Devices, 2009, vol. 56, no. 6, pp. 1533–1537.
4. Deb S., Singh N.B., Das D., De A.K., Sarkar S.K. Analytical model of threshold voltage and subthreshold slope of SOI and SON MOSFETs: A comparative study. Jour. Electron Devices. 2010, vol. 8, no. 1, pp. 300–309.
5. Li J., Liu H.X., Li B. Two-dimensional threshold voltage analytical model of DMG strained-silicon-on-insulator MOSFETs. Jour. of Semiconductors, 2010, vol. 31, no. 8, pp. 84008–84024.
6. Масальский Н.В. Характеристики двухзатворных КНИ КМОП-нанотранзисторов для перспективных технологий с низким уровнем потребляемой мощности // Микроэлектроника. 2012. Т. 41. № 6. С. 436–444.
7. Colinge J.P. Multiple-gate SOI MOSFETs. Solid-State Electronics, 2004, vol. 48, no. 3, pp. 897–909.
8. Venkateshwar G.R., Kumar M.J. A new dual-material double-gate (DMDG) nanoscale SOI MOSFET – Two dimensional analytical modeling and simulation. IEEE Trans. on Nanotechnology, 2005, vol. 4, no. 3, pp. 260–268.
9. Goel K., Saxena M., Gupta M. Two-dimensional analytical threshold voltage model for DMG epi-MOSFET. IEEE Trans Electron Devices, 2005, vol. 52, no. 1, pp. 23–31.
10. Chiage T.K., Chen M.L. A new analytical threshold voltage model for symmetrical double-gate MOSFETs with high-k gate dielectrics. Solid State Electron, 2007, vol. 51, no. 3, pp. 387–395.
11. Venkataraman V., Nawal S., Kumar M.J. Compact analytical threshold-voltage model of nanoscale fully depleted strained-Si on silicon-germanium-on-insulator (SGOI) MOSFETs. IEEE Trans Electron Devices, 2007, vol. 54, no. 3, pp. 554–562.
12. Sharma R.K., Gupta M., Gupta R.S. Two-dimensional analytical subthreshold model of graded channel DG FD SOI n-MOSFET with gate misalignment effect. Superlattices and Micro-

structures, 2009, vol. 45, no. 1, pp. 91–103.

13. Goel K., Saxena M., Gupta M., Gupta R.S. Modeling and simulation of a nanoscale three-region tri-material gate stack (TRIMGAS) MOSFET for improved carrier transport efficiency and reduced hot electron effects. IEEE Trans. Electron Devices, 2006, vol. 53, no. 7, pp. 1623–1633.

14. Silvaco Int. 2004: ATLAS User's Manual A 2D numerical device simulator. URL: http://www.silvaco.com/ (дата обращения: 22.10.2016).

15. Масальский Н.В. Проблемы схемотехнического моделирования нанотранзисторов со структурой «кремний на изоляторе» // Программные продукты и системы. 2013. № 4. С. 60–67.

Software & Systems
DOI: 10.15827/0236-235X.119.359-366

Received 04.05.17
2017, vol. 30, no. 3, pp. 359–366

POTENTIAL DISTRIBUTION SIMULATION FOR A DUAL-GATE FIELD SILICON ON INSULATOR NANOTRANSISTOR WITH AN ASYMMETRIC GATE

N.V. Masalsky [1], *Ph.D. (Phisics and Mathematics), Head of Sector, volkov@niisi.ras.ru*

[1] *Federal State Institution "Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences" (SRISA RAS), Nakhimovsky Ave. 36/1, Moscow, 117218, Russian Federation*

Abstract. The paper considers a 2D analytical model of potential distribution and a following threshold voltage model for a thin-film dual-gate field nanotransistor with "silicon-on-insulator" structure with a front gate from two sequentially connected materials with different work function. It also investigates potential behavior in transistor structures in the field of gate lengths less than 50 nanometers, its dependence on drain offsets for different configurations of a frontal gate.

The received results show that using two materials with different work function in a frontal gate leads to effective suppression of short-channel effects due to a step function in a potential profile on the boundary of two materials. The shift of a surface line of a surface potential minimum is insignificant with increasing drain biases. The peak electric field at a drain considerably decreases in comparison with similar transistor structure but with a uniform frontal gate. At the same time, it is predicted to be a higher active interelectrode conductance and reduction of subthreshold leak in comparison with classical two-gate field nanotransistors with structure "silicon-on-insulator" in the gate lengths less than 50 nanometers.

The distinctive properties of the researched structures are essential lowering of an electrical field peak on boundary of a working area and a drain, reduction of parasitic effects of threshold voltage. The simulation results are in good agreement with experiment data received by means of commercially available software package ATLAS intended for simulation of complex transistor structures.

Thus, using two materials with different work function in a front gate of dual-gate field nanotransistors with the structure "silicon-on-insulator" improves their key electrophysical characteristics in comparison with dual-gate field transistors with a uniform front gate and volume analogues.

Keywords: dual-gate SOI CMOS nanotransistor, 2D Poisson equation, asymmetric front gate, potential distribution, threshold voltage.

References

1. *International technology roadmap for semiconductor 2014 edition*. Available at: http://public.itrs.net/ (accessed November 17, 2014).

2. Djeffal F., Meguellati M., Benhaya A. A two-dimensional analytical analysis of subthreshold behavior to study the scaling capability of nanoscale graded channel gate stack DG MOSFETs. *Physica E*. 2009, vol. 41, no. 8, pp. 1872–1879.

3. Monga U., Fjeldly T.A. Compact subthreshold current modeling of short-channel nanoscale double-gate MOSFET. *IEEE Trans. Electron Devices*. 2009, vol. 56, no. 6, pp. 1533–1537.

4. Deb S., Singh N.B., Das D., De A.K., Sarkar S.K. Analytical model of threshold voltage and subthreshold slope of SOI and SON MOSFETs: A comparative study. *Jour. Electron Devices*. 2010, vol. 8, no. 1, pp. 300–309.

5. Li J., Liu H.X., Li B. Two-dimensional threshold voltage analytical model of DMG strained-silicon-on-insulator MOSFETs. *Jour. of Semiconductors*. 2010, vol. 31, no. 8, pp. 84008–84024.

6. Masalsky N.V. Characteristics of double gate SOI CMOS nanotransistors for perspective technologies with the low supply power. *Microelectronika* [Microelectronics]. 2012, vol. 41, no. 6, pp. 436–444 (in Russ.).

7. Colinge J.P. Multiple-gate SOI MOSFETs. *Solid-State Electronics*. 2004, vol. 48, no. 3, pp. 897–909.

8. Venkateshwar G.R., Kumar M.J. A new dual-material double-gate (DMDG) nanoscale SOI MOSFET – Two dimensional analytical modeling and simulation. *IEEE Trans. on Nanotechnology*. 2005, vol. 4, no. 3, pp. 260–268.

9. Goel K., Saxena M., Gupta M. Two-dimensional analytical threshold voltage model for DMG epi-MOSFET. *IEEE Trans Electron Devices*. 2005, vol. 52, no. 1, pp. 23–31.

10. Chiage T.K., Chen M.L. A new analytical threshold voltage model for symmetrical double-gate MOSFETs with high-k gate dielectrics. *Solid State Electronics*. 2007, vol. 51, no. 3, pp. 387–395.

11. Venkataraman V., Nawal S., Kumar M.J. Compact analytical threshold-voltage model of nanoscale fully depleted strained-Si on silicon-germanium-on-insulator (SGOI) MOSFETs. *IEEE Trans. Electron Devices*. 2007, vol. 54, no. 3, pp. 554–562.

12. Sharma R.K., Gupta M., Gupta R.S. Two-dimensional analytical subthreshold model of graded channel DG FD SOI n-MOSFET with gate misalignment effect. *Superlattices and Microstructures*. 2009, vol. 45, no. 1, pp. 91–103.

13. Goel K., Saxena M., Gupta M., Gupta R.S. Modeling and simulation of a nanoscale three-region tri-material gate stack (TRIMGAS) MOSFET for improved carrier transport efficiency and reduced hot electron effects. *IEEE Trans. Electron Devices*. 2006, vol. 53, no. 7, pp. 1623–1633.

14. *Silvaco Int. 2004: ATLAS User's Manual. A 2D numerical device simulator*. Available at: http://www.silvaco.com/ (accessed October 22, 2015).

15. Masalsky N.V. Nanotransitors circuitry simulation problems with silicon-on-insulator structure. *Programmnye produkty i sistemy* [Software & Systems]. 2013, no. 4, pp. 60–67 (in Russ.).