

М. Н. Левин, А. Г. Кадменский, С. Г. Кадменский,
А. В. Татаринцев, В. И. Литманович

(Воронеж)

ДВУМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОРОТКОКАНАЛЬНЫХ МОП-ТРАНЗИСТОРОВ С УЧЕТОМ ПОВЕРХНОСТНЫХ СОСТОЯНИЙ

Проведен двумерный анализ влияния поверхностных состояний на функционирование короткоканальных МОП-транзисторов. Показано, что наличие ПС усиливает влияние потенциала стока на пороговое напряжение прибора, а также снижает напряжение «прокола». Предложена методика определения плотности ПС и эффективного заряда в подзатворном диэлектрике для короткоканальных транзисторов.

Введение. Известно, что ионизирующее излучение, горячие носители, электрическое поле высокой напряженности и многие другие факторы способны привести к образованию поверхностных состояний (ПС) на границе раздела полупроводник — диэлектрик и заряда в окисле МОП-транзисторов (МОПТ) [1—5]. Захваченный в подзатворном окисле заряд приводит к сдвигу порогового напряжения ΔV_{α} . Влияние ПС на вольт-амперные характеристики (ВАХ) МОПТ является более сложным. Кроме вклада в сдвиг порогового напряжения ΔV_{α} , ПС вызывают уменьшение крутизны сток-затворных ВАХ G и возрастание фактора S , характеризующего наклон ВАХ на участке подпорогового тока. Для МОПТ с длинным каналом эти эффекты могут быть описаны аналитически [1, 2, 6]. Более того, для таких приборов возможно решение обратной задачи, а именно определение величин эффективного заряда в окисле Q_{α} и плотности ПС N_s по ВАХ. Разработаны методы определения этих величин из зависимостей тока канала от напряжения на стоке [6], а также из сток-затворных характеристик, измеряемых в триодном режиме [7] или в подпороговой области [8]. Значительно труднее учесть влияние поверхностных состояний на характеристики короткоканальных приборов, моделирование которых является двумерной задачей. Вильсон проанализировал поведение короткоканальных МОПТ с радиационно-индуцированными ПС и зарядом в диэлектрике на основе двумерного анализа распределения электрического поля в приборе и упрощающего предположения о протекании тока в плоском слое на поверхности полупроводника [9, 10].

В настоящей работе проводится двумерное моделирование короткоканального транзистора с ПС без использования этого упрощающего предположения. Рассмотрено поведение прибора в области слабой инверсии, наиболее чувствительной к влиянию ПС. Показана возможность определения величин плотности ПС и эффективного заряда в подзатворном окисле по подпороговым токам.

I. Модель. Расчет ВАХ МОПТ, структура которого показана на рис. 1, проводился на основе численного решения следующей системы уравнений:

$$\nabla^2 \Psi = 0; \quad (1)$$

в области $ABGH$

$$\nabla^2 \Psi = -(q/\epsilon_0 \epsilon_{Si})(p - n + N_D - N_A), \quad (2)$$

$$\partial n / \partial t = (1/q) \nabla \vec{j}_n, \quad (3)$$

$$\partial p / \partial t = -(1/q) \nabla \vec{j}_p, \quad (4)$$

$$\vec{j}_n = -qn\mu_n \nabla \Psi + kT\mu_n \nabla n, \quad (5)$$

$$\vec{j}_p = -q\mu_p \nabla \Psi - kT\mu_p \nabla p \quad (6)$$

с граничными условиями:

1) на AB, GH

$$\partial \Psi / \partial y = \partial n / \partial y = \partial p / \partial y = 0;$$

2) на BC, FG, AH

$$np = n_i^2,$$

$$p - n + N_D - N_A = 0,$$

$$\Psi_{BG} = V_s, \quad \Psi_{FG} = V_D, \quad \Psi_{AH} = V_{SUB};$$

3) на CF

$$\epsilon_{ox}\epsilon_0(\partial \Psi / \partial x) \Big|_{ox} - \epsilon_{Si}\epsilon_0(\partial \Psi / \partial x) \Big|_{Si} = Q_{int};$$

4) на CD, EF

$$\partial \Psi / \partial x = 0;$$

5) на DE

$$\Psi \Big|_{DE} = V_G.$$

В уравнениях (1)–(6) использованы общепринятые обозначения [11].

В диэлектрике решается уравнение Лапласа, однако эффективный заряд Q_{eff} учитывается слагаемым в поверхностном заряде на границе раздела:

$$Q_{int} = Q_{ox} + Q_i(y). \quad (7)$$

Второе слагаемое в уравнении (7) учитывает заряд на ПС, величина которого зависит от потенциалов на затворе, подложке и стоке. Заполнение ПС может меняться вдоль длины канала. В предположении, что плотность ПС N_{ss} постоянна по ширине запрещенной зоны кремния, заряд на поверхностных состояниях записывается следующим образом [6]:

$$Q_i(y) = qN_{ss}(\Psi_s - \varphi_c), \quad (8a)$$

где $\Psi_s = \Psi(0, y)$ — поверхностный потенциал; φ_c — разность между квазиуровнями Ферми основных и неосновных носителей.

В случае амфотерного характера ПС, т. е. когда они проявляют себя как акцепторы в верхней половине запрещенной зоны и как доноры в нижней, заряд Q_i записывается следующим образом:

$$Q_i(y) = qN_{ss}(\Psi_s - \varphi_c - \varphi_B), \quad (8b)$$

где $\varphi_B = (kT/q) \ln((N_D - N_A)/n_i)$ — объемный потенциал.

Используя известные зависимости концентрации неосновных носителей от поверхностного потенциала и разности квазиуровней Ферми:

$$n(0, y) = n_i \exp((q/kT)(\Psi_s - \varphi_c - \varphi_B)),$$

$$p(0, y) = n_i \exp((-q/kT)(\Psi_s - \varphi_c - \varphi_B)),$$

можно записать заряд на ПС следующим образом:

$$Q_i(y) = -kTN_{ss} \ln \frac{n(0, y)}{n_i}, \quad (9a)$$

n -канал,

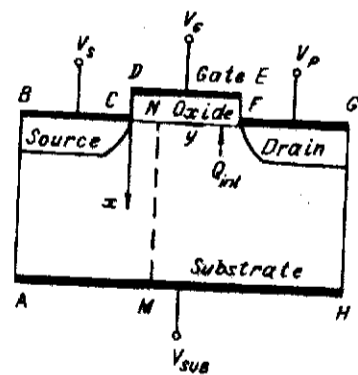


Рис. 1. Двумерная модель МОП-транзистора

$$Q_n(y) = kTN_{ss} \ln \frac{p(0, y)}{n_i}, \quad p\text{-канал.} \quad (96)$$

Знаки в выражениях (9а), (9б) учитывают отрицательный заряд на акцепторных состояниях в *n*-канальных транзисторах и положительный заряд на донорных состояниях в *p*-канальных приборах.

При решении системы уравнений (1) — (6) использовалось граничное условие (7), в котором заряд на ПС выражался уравнениями (9а) и (9б).

Ток стока рассчитывался интегрированием по поперечному сечению полупроводника (см. рис. 1): $I_D = \int_M^N (j_n + j_p) dx$.

II. Область подпороговых токов. Рассмотрим ВАХ МОПТ с поверхностными состояниями, равномерно распределенными по длине канала. На рис. 2 представлены характеристики, рассчитанные для подпороговой области. Расчет проведен для промежуточной длины канала, при которой в приборе без заряда в диэлектрике и ПС короткоканальный эффект зависимости порогового напряжения V_T от напряжения на стоке проявляется незначительно (кривые 1). Наличие ПС существенно меняет поведение ВАХ (кривые 2). Во-первых, так же как и в приборах с длинным каналом, при увеличении плотности ПС уменьшается наклон ВАХ (увеличивается параметр $S \equiv \left(\frac{\partial \ln(I_D/I_0)}{\partial V_G}\right)^{-1}$), во-вторых, возникает (или усиливается) зависимость порогового напряжения V_T от напряжения на стоке V_D . Наличие заряда в диэлектрике также приводит к появлению зависимости V_T от V_D (кривые 3).

На рис. 3 представлены зависимости порогового напряжения от напряжения на стоке, рассчитанные для разных плотностей ПС. Зависимости $V_T(V_D)$ являются линейными:

$$V_T = V_{T0} - \gamma V_D. \quad (10)$$

Коэффициент γ зависит от плотности ПС, величины эффективного заряда Q_{mi} и увеличивается с ростом Q_{mi} .

Усиление зависимости порогового напряжения от потенциала стока, наблюдаемое при повышении плотности ПС или эффективного заряда в окисле, обусловлено экранированием части поверхностного заряда $\Delta Q_{mi}(V_D)$, расположенного вблизи стока, не электродом затвора, а электродом стока. Повышение напряжения на стоке увеличивает долю поверхностного заряда $\Delta Q_{mi}(V_D)$, экранируемую стоком. При большей плотности ПС больше величина $\Delta Q_{mi}(V_D)$. Экранирование стоком части поверхностного заряда приводит к увеличению заряда, индуцируемого в полупроводнике напряжением на затворе, что проявляется в открытии канала при меньшем потенциале затвора.

Таким образом, наличие ПС усиливает известный короткоканальный эффект разделения заряда в полупроводнике МОПТ на части, экранируемые затвором и стоком. Эффект такого разделения приводит к зависимости порогового напряжения от смещения на стоке и усиливается с уменьшением длины канала [12].

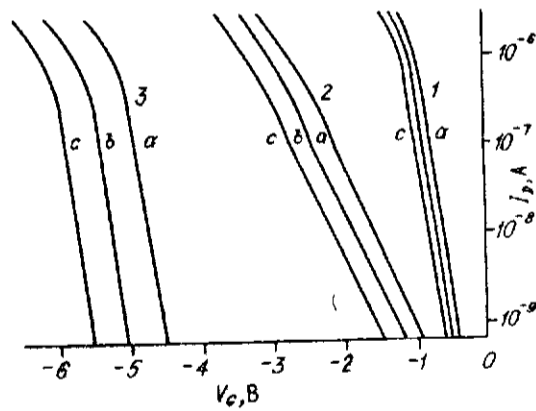


Рис. 2. Подпороговые токи в МОПТ-транзисторе.
 Параметры: $L = 4,3 \text{ мкм}$, $N_D = 6 \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-3}$, $d_{ок} = 120 \text{ нм}$; $Q_{от} = 0$; 2 — 0, $N_D = 10^{12} \text{ см}^{-2}$; 3 — $Q_{от} = 3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, $N_{от} = 0$, $V_D = 5, 10, 15 \text{ В}$ для α, β, γ соответственно

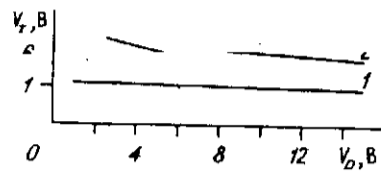


Рис. 3. Зависимость порогового напряжения МДП-транзистора от напряжения на стоке.

Параметры транзистора соответствуют рис. 2. Равномерное распределение плотности поверхностных состояний: 1 — $N_{ss} = 0$, 2 — $N_{ss} = 3 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2} \cdot \text{эВ}^{-1}$, 3 — $N_{ss} = 10^{12} \text{ см}^{-2} \cdot \text{эВ}^{-1}$, 4 — $N_{ss} = 0$, $Q_{of} = 2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$

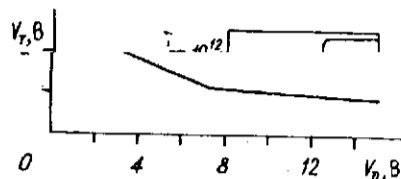


Рис. 4. Зависимость порогового напряжения МДП-транзистора от напряжения на стоке.

На вставке — зависимость плотности ПС от координаты вдоль канала

Согласно такой интерпретации, плотность ПС вблизи стока влияет на зависимость порогового напряжения от потенциала стока. С другой стороны, наклон ВАХ подпорогового тока определяется плотностью ПС на том участке канала, поверхностный потенциал которого управляется напряжением затвора. Следовательно, характеристики короткоканальных МОП-приборов должны существенно зависеть от распределения ПС вдоль длины канала.

На рис. 4 представлены зависимости порогового напряжения от смещения на стоке, рассчитанные для ступенчатого распределения ПС. Выбранному распределению ПС соответствует зависимость $V_T(V_D)$ с двумя участками, имеющими различные наклоны. При малых напряжениях на стоке выполняется условие $a < l$, где a — длина участка с высокой плотностью ПС N_{ss2} . Наклон первого участка определяется плотностью N_{ss2} . При высоких потенциалах на стоке имеет место $a > l$ (второй участок), а наклон $V_T(V_D)$ -характеристики соответствует плотности ПС N_{ss1} . Напряжение $V_D = V_1$ соответствует условию $a = l$ и может быть использовано для определения длины области с повышенной плотностью ПС вблизи стока.

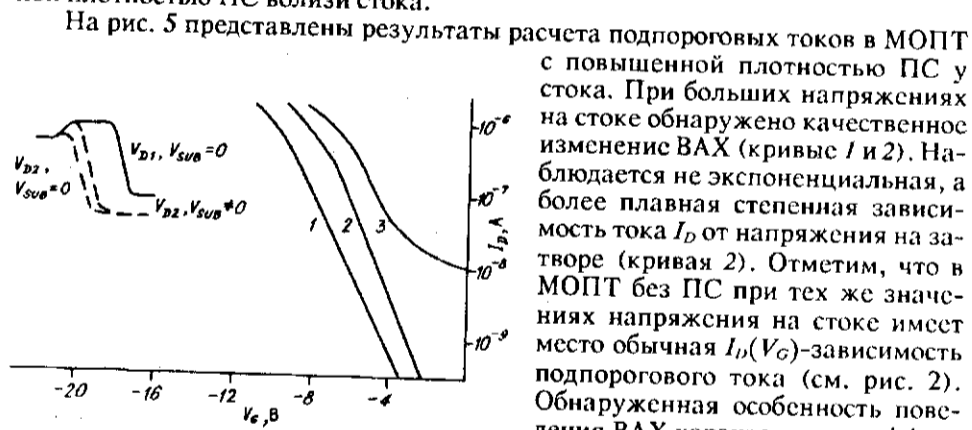


Рис. 5. Подпороговые токи в МДП-транзисторе с неравномерно распределенной плотностью ПС по длине канала при различных смещениях (В):

1 — $V_D = -2$, $V_{SUB} = 0$, 2 — $V_D = -15$, $V_{SUB} = 0$, 3 — $V_D = -15$, $V_{SUB} = 5$

На рис. 5 представлены результаты расчета подпороговых токов в МОПТ с повышенной плотностью ПС у стока. При больших напряжениях на стоке обнаружено качественное изменение ВАХ (кривые 1 и 2). Наблюдается не экспоненциальная, а более плавная степенная зависимость тока I_D от напряжения на затворе (кривая 2). Отметим, что в МОПТ без ПС при тех же значениях напряжения на стоке имеет место обычная $I_D(V_G)$ -зависимость подпорогового тока (см. рис. 2). Обнаруженная особенность поведения ВАХ характерна для эффекта «прокола». Этот эффект обусловлен понижением полем стока высоты потенциального барьера на переходе исток — подложка [12—14]. На вставке к рис. 5 приведено условное изображение распреде-

ления потенциала в $n-p-n$ -структуре исток — подложка — сток, иллюстрирующее этот эффект. Индуцируемое стоком снижение высоты потенциального барьера на истоке вызывает инжекцию неосновных носителей из истока в подложку и собирание их полем стока. Проникновение поля стока вдоль границы раздела сдерживается за счет участия ПС в экранировании вдоль этого поля. При этом изменяется форма области пространственного заряда, индуцируемого стоком, и увеличивается расстояние от поверхности, на котором происходит понижение барьера истока. Протекание тока «прокола» в глубине полупроводниковой подложки характеризуется ослаблением

III. Определение величин плотности ПС и эффективного заряда. В предыдущем разделе было рассмотрено влияние ПС и заряда в диэлектрике на ВАХ МОПТ в области слабой инверсии. Проанализируем решение обратной задачи, т. е. возможность нахождения величин плотности ПС и эффективного заряда по подпороговым токам.

Для МОПТ с длинным каналом такая проблема решена [6, 8, 15]. ВАХ в области подпороговых токов для длинноканальных приборов может быть выражена в явном виде:

$$I_D = I_0 \exp\left(\frac{\beta}{n}(V_G - V_T)\right) \left(1 - \exp\left(-\beta \frac{m}{n} V_D\right)\right), \quad (11)$$

где I_0 — ток, измеряемый при $V_G = V_T$ в режиме насыщения относительно напряжения на стоке ($V_D \geq 3n/\beta m$); $n = (c_{ox} + c_D + c_{ss})/c_{ox}$;

$m = (c_{ox} + c_D)/c_{ox}$; $c_{ox} = \epsilon_0 \epsilon_{ox}/d_{ox}$ — геометрическая емкость диэлектрика; $c_{ss} = qN_{ss}$ — емкость ПС; $c_D = \left(\frac{\epsilon_S q(N_A - N_D)}{2(\Psi_s + V_{SUB}) - \beta^{-1}}\right)^{-1/2}$ — емкость области пространственного заряда полупроводника.

Плотность ПС рассчитывается из параметров S (или $n = \beta S$), характеризующих наклон ВАХ (11), построенной в координатах $\ln(I_D/I_0) - V_G$:

$$N_{ss} = (c_{ox}/q)(n - 1) - c_D/q. \quad (12)$$

Эффективный заряд в диэлектрике определяется по измеряемому значению порогового напряжения V_T и рассчитанному значению плотности ПС N_{ss} :

$$Q_{eff} = Q_B^* - qN_{ss}\varphi_B - c_{ox}(V_T - 2\varphi_B), \quad (13)$$

где Q_B^* — объемный заряд полупроводника при $\Psi_s = 2\varphi_B$.

Для МОПТ с коротким каналом плотность ПС может быть также рассчитана по формуле (12). Однако определить Q_{eff} из уравнения (13) не представляется возможным из-за наличия зависимости порогового напряжения V_T от смещения на стоке V_D . Согласно результатам расчета (разд. II), при равномерно распределенной плотности ПС по длине канала эта зависимость является линейной, а коэффициент пропорциональности γ определяется величинами Q_{eff} и N_{ss} . На рис. 6 представлены

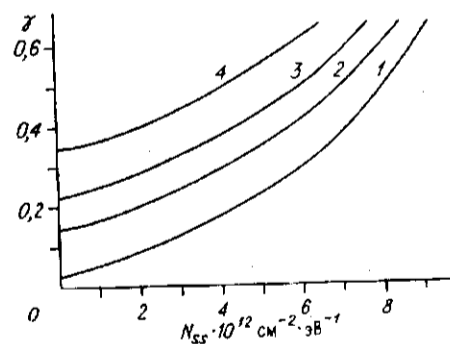


Рис. 6. Зависимость параметра γ от плотности ПС,

Q_{eff} — параметр:

1 — $Q_{eff} = 0$, 2 — 10^{11} , 3 — 10^{12} , 4 — $2 \cdot 10^{12}$

зависимости параметра γ от плотности ПС, рассчитанные для различных Q_m . С использованием таких зависимостей значение эффективного заряда Q_{eff} может быть найдено по величинам γ и N_{ss} , определяемым из ВАХ в подпороговой области.

Заключение. Обобщим результаты проведенного анализа.

1. Наличие ПС усиливает влияние потенциала стока на пороговое напряжение короткоканальных МОПТ. Это обусловлено двумерным эффектом разделения заряда ПС на части, экранируемые стоком и затвором. Экранирование части заряда ПС стоком увеличивает индуцируемый затвором заряд в полупроводнике, что приводит к открытию канала при меньших значениях порогового напряжения. Чем выше потенциал стока, тем больше доля экранируемого этим электродом заряда ПС и заметнее уменьшение порогового напряжения. Функциональная зависимость порогового напряжения от смещения на стоке определяется распределением плотности ПС по длине канала вблизи стока. При равномерном распределении ПС эта зависимость линейна, а коэффициент пропорциональности между V_T и V_D увеличивается с ростом плотности ПС.

2. Наличие ПС вблизи стока снижает напряжение прокола в короткоканальном МОПТ. Это обусловлено влиянием ПС на форму пространственного заряда, индуцируемого стоком в полупроводнике.

3. Плотность ПС и эффективный заряд в диэлектрике короткоканального МОПТ могут быть определены из ВАХ, измеряемых в области подпороговых токов. Плотность ПС определяется, как и для приборов с длинным каналом, по наклону ВАХ в координатах $\ln I_D - V_G$. Для нахождения эффективного заряда в МОПТ с коротким каналом требуется нахождение линейной зависимости между пороговым напряжением и смещением на стоке, а также расчет зависимости этого коэффициента от плотности ПС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sze S. M. Physics of Semiconductors.—N. Y.: Wiley-Interscience, 1981.
2. Nicollian E. N., Brews J. R. MOS Physics and Technology.—N. Y.: Wiley-Interscience, 1982.
3. Aitkens J. M. 1 μm -MOSFET VLSI technology: P. VIII: radiation effects // IEEE J. Sol. St. Circ.—1979.—SC-14, N 2.—P. 294.
4. Гольденберг А. Б., Кадменский А. Г., Рувинский М. А. Модификация двумерных распределений примеси при немонохроматической ионной имплантации // Тез. докл. XIX Всесоюз. сов. по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами.—М.: Изд-во Моск. ун-та, 1989.
5. Кадменский А. Г., Файзрахманов В. Р. Расчет профиля имплантированных ионов в кристалл кремния // Автоматрия.—1986.—№ 5.
6. Overstraeten R. J., Declerck G. J., Muls P. A. Theory of the MOS transistor — new method to determine the number of surface states // IEEE Trans. Electron. Dev.—1979.—ED-22, N 5.—P. 282.
7. Galloway K. F., Gaitan M., Russel T. I. A simple model of separating interface and oxide charge effects of MOS device characteristics // IEEE Trans. Nucl. Sci.—1984.—NS-31, N 6.—P. 1497.
8. Mc. Wroter P. J., Winokur P. S. Simple technique for separating the effects of interface traps and trapped-oxide charge in metal — oxide — semiconductor — transistors // Appl. Phys. Lett.—1986.—48(2)—P. 133.
9. Wilson C. L., Blue J. L. Modelling of ionizing radiation effects in short-channel MOSFETs // IEEE Trans. Nucl. Sci.—1982.—NS-29, N 6.—P. 1676.
10. Wilson C. L., Blue J. L. Two-dimensional modelling of N -channel MOSFETs included radiation induced interface and oxide charge // IEEE Trans. Nucl. Sci.—1984.—NS-31, N 6.—P. 1448.
11. Snowden M. C. Semiconductor device modelling // Rep. Prog. Phys.—1985.—48.—P. 223.
12. Muller R. S. Device Elements for Integrated Circuits /2nd. ed.—N. Y.: J. Wiley, 1986.
13. Hsu F. C., Muller R. S., Hu C., Ko R. K. A simple punchthrough model for short-channel MOSFETs // IEEE Trans. Electron. Dev.—1983.—ED-30, N 10.—P. 134.
14. Troutman R. R. VLSI limitation from drain induced barrier lowering // IEEE J. of Sol. St. Circ.—1979.—SC-14, N 2.—P. 383.
15. Russel T. J., Bennet H. S., Gaitan M. et al. Correlation between CMOS transistor and capacitor measurements of interface trap spectra // IEEE Trans. on Nucl. Sci.—1986.—NS-33, N 6.—P. 1228.

Поступила в редакцию 11 ноября 1991 г.