

УДК 621.315

М. Плиссе, П. Шик

(Претория, ЮАР)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРЕДПОРОГОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МНОП-ТРАНЗИСТОРОВ С РЕЗИСТИВНЫМ ЗАТВОРОМ*

В отличие от обычного МОП-транзистора МОП-транзистор с резистивным затвором позволяет располагать большое количество контактов на одном затворе (многоконтактный затвор). Развита одномерная модель, дающая возможность моделировать характеристики МНОП-транзисторов с резистивным затвором с несколькими контактами на затворе. Исследовалось предпороговое поведение МНОП-прибора с двойным контактом на затворе. Полученные результаты указывают на предпороговое поведение характеристик в широком диапазоне приложенных к затвору напряжений. Были получены линейная и квадратичная зависимости тока стока от напряжения на затворе. Наблюдалось хорошее согласие результатов расчета и эксперимента.

Введение. В отличие от обычного МОП-транзистора в МОП-транзисторе с резистивным затвором применяется многоконтактный затвор. Благодаря различным градиентам напряжения контакты могут быть размещены на самом затворе и давать боковой ток, текущий вдоль затвора. Возникающие в затворе транзистора градиенты напряжения позволяют достичь новых интересных характеристик прибора, особенно полезных при разработке и использовании аналоговых интегральных схем. Конфигурация МОП-транзистора с резистивным затвором представлена на рис. 1.

Существующие пакеты программ численного моделирования приборов [1, 2] не позволяют моделировать МОП-транзисторные структуры с резистивным затвором. Была развита одномерная модель для расчета РЗМОП (RGMOS)-транзисторов (МОП с резистивным затвором) с любой формой затвора. С помощью этой модели можно моделировать МОП-транзисторы с многоконтактными затворами любой формы. Вольт-амперные характеристики транзистора могут быть теперь определены как функция множества приложенных к затвору напряжений и использоваться как уникальный инструмент моделирования нестандартных транзисторных структур.

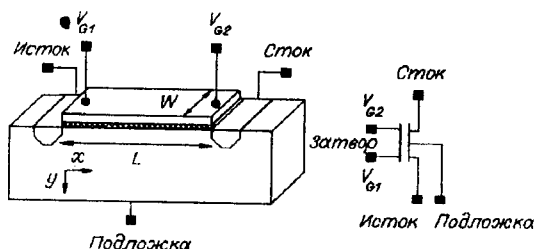


Рис. 1. МОП-транзистор с резистивным затвором с двумя контактами на затворе

* Материалы были доложены на III Международном семинаре по моделированию приборов и технологий. Обнинск, июль 1993 г.

Теория. Теория обычного МОП-транзистора не может быть непосредственно применена для расчета характеристик МОП-транзисторов с резистивным затвором. За основу нами была взята теория МОП-транзисторов Канга [3] и Николиана и Брюса [4].

В МОП-транзисторе с резистивным затвором несколько контактов связаны с затвором и создают в нем градиент напряжения. При этом затворное напряжение меняется от точки к точке вдоль канала транзистора.

В МОП-транзисторе ток определяется частично электрическим полем в приборе (дрейфовый ток) и частично диффузией (диффузионный ток). В присутствии тока плотности носителей согласуются таким образом, чтобы в каждом сечении канала было достаточно носителей для обеспечения полного тока с учетом обеих компонент тока. Согласование плотности носителей с токовым потоком выражается в согласовании уровня Ферми в каждой точке канала. Это подразумевает замену уровня Ферми Φ_F меняющимся от точки к точке квазиуровнем Ферми (Φ_{Fn} для электронов или Φ_{Fp} для дырок), который и обеспечивает требуемый ток. Во всех полупроводниковых приборах при протекании в них тока используется понятие квазиуровня Ферми.

Представленные ниже уравнения основаны на результатах работы, выполненной Кангом [3] (V_{sb} предполагается равным нулю).

Принимая во внимание квазиуровень Ферми, плотность дырок выражаем следующим образом:

$$p = n_i e^{(\beta\Phi_{Fp} - \beta\Phi_s)}, \quad (1)$$

а плотность электронов —

$$n = n_i e^{(\beta\Phi_s - \beta\Phi_{Fn})}, \quad (2)$$

где n_i — собственная концентрация носителей; $\beta = q/KT$; Φ_s — поверхностный потенциал.

В n -канальных приборах ток переносится электронами, дырки при этом остаются в равновесии:

$$\Phi_{Fp} = \Phi_F = \frac{KT}{q} \ln \left(\frac{N_A}{n_i} \right), \quad (3)$$

где N_A — концентрация акцепторов в подложке.

Вклад плотности электронов в ток равен

$$j_{dr} = -q\mu n \frac{d\Phi_s}{dx}, \quad (4)$$

где [5, 6]

$$\mu(x) = \mu_0 \left[1 + \frac{\theta Q_n(x)}{C_{ox}} \right]^{-1}. \quad (5)$$

Здесь x равно нулю на истоке и возрастает от истока к стоку (L); μ — подвижность; θ — постоянная, определяющая деградацию подвижности; μ_0 — максимально возможное значение подвижности.

Диффузионный ток при этом имеет вид:

$$j_{dif} = qD_n \frac{dn}{dx}, \quad (6)$$

где

$$D_n = \frac{KT}{q} \mu, \quad (7)$$

D_n — коэффициент диффузии электронов, T — температура.

Полная плотность тока получается сложением уравнений (4) и (6) с учетом уравнения (2) вместе с соотношением Эйнштейна (7):

$$j = -q\mu n \frac{d\Phi_{Fn}}{dx}. \quad (8)$$

После интегрирования плотности тока поперек толщины инверсионного слоя в направлении y и умножения на ширину канала W получаем

$$I = -W\mu Q_n \frac{d\Phi_{Fn}}{dx}, \quad (9)$$

где Q_n — плотность заряда инверсионного слоя на единицу площади:

$$Q_n = C_{ox}[(V_G - V_{FB}) - \Phi_s] - qN_A L_B \sqrt{2\beta\Phi_s}, \quad (10)$$

$$Q_n = -(Q_s + qN_A\omega), \quad (11)$$

$$\omega = \sqrt{2} L_B \sqrt{\beta\Phi_s}, \quad (12)$$

$$L_B = \sqrt{(\epsilon_{Si}\epsilon_0)/(\beta q N_A)}, \quad (13)$$

L_B — длина Дебая; ϵ_0 — абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума; ϵ_{Si} — относительная диэлектрическая проницаемость кремния.

Для расчета тока, протекающего в МОП-транзисторе, необходимо знать производную $d\Phi_{Fn}/dx$. Эта производная может быть охарактеризована в терминах изгиба зон, так как Φ_s и Φ_{Fn} связаны законом Гаусса:

$$C_{ox} \left(\{V_G - V_{FB}\} - \Phi_s \right) = -Q_s, \quad (14)$$

где

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{ox}}{d_{ox}}, \quad (15)$$

$$V_{FB} = \Phi_{ms} - \frac{Q_{ox}}{C_{ox}}, \quad (16)$$

$$\Phi_{ms} = \Phi_{m0} - \left(\Phi_{s0} + \frac{E_g}{2} + \Phi_F \right) \quad (17)$$

и V_{FB} — напряжение плоских зон; V_G — напряжение на затворе; C_{ox} — емкость диэлектрика на единицу площади; d_{ox} — толщина окисла; E_g — ширина запрещенной зоны кремния; Q_{ox} — встроенный заряд окисла на единицу поверхности; ϵ_{ox} — диэлектрическая проницаемость окисла; Φ_{m0} — работа выхода металла; Φ_{ms} — разность работ выхода металл—кремний; Φ_{s0} — работа выхода кремний—окисел.

Подставляя (10) и (11) в (14), получаем

$$\Phi_{Fn} = \Phi_F - \frac{1}{\beta} \ln \left\{ \frac{(\beta \{V_G - V_{FB}\} - \beta\Phi_s)^2 / a^2 - \beta\Phi_s}{\left(\frac{n_i}{N_A}\right) (e^{\beta\Phi_s} - 1)} \right\}, \quad (18)$$

где Φ_{Fn} , Φ_s и V_G — функции x и

$$a = \sqrt{2} \left(\frac{C_{FB}}{C_{0x}} \right), \quad (19)$$

$$C_{FB} = \frac{\epsilon_{Si}\epsilon_0}{L_B}, \quad (20)$$

C_{FB} — емкость на единицу площади кремниевой части МОП-емкости при условии плоских зон.

Затем рассчитаем производную от уравнения (18). Необходимо отметить, что предыдущие работы [3, 4] не принимали во внимание эффект градиента затворного напряжения. В обычном МОП-транзисторе V_G не является функцией x , так как напряжение на затворе постоянно по всей площади затвора. В транзисторе с резистивным затвором V_G необходимо рассматривать как функцию x . Эту зависимость нужно учесть при вычислении производной Φ'_{Fn} . Нами было получено уравнение, учитывающее зависимость V_G от x , позволяющее моделировать характеристики МОП-транзисторов с резистивным затвором:

$$\frac{d\Phi_{Fn}}{dx} = \Phi'_{Fn} = \frac{e^{\beta\Phi_s} \Phi'_s}{(e^{\beta\Phi_s} - 1)} - \left(\frac{2\beta}{a^2} \right) \frac{\{(V_G - V_{FB})V'_G + \Phi_s\Phi'_s - (V_G - V_{FB})\Phi'_s - \Phi_s V'_G - \frac{a^2}{2\beta} \Phi'_s\}}{\{(\beta[V_G - V_{FB}] - B\Phi_s)^2/a^2 - \beta\Phi_s\}}. \quad (21)$$

Подставляя уравнения (21) и (10) в уравнение (9), получаем

$$I = - \frac{W\mu C_{0x}}{\beta} \left[\beta\{V_G - V_{FB}\} - \beta\Phi_s - a\sqrt{\beta\Phi_s} \right] [\Phi'_{Fn}], \quad (22)$$

где I — полный ток транзистора от стока к истоку.

Для затворных контактов, показанных на рис. 1:

$$V'_G = \frac{V_{G2} - V_{G1}}{L}, \quad (23)$$

$$V_G(x) = V_{G1} + V'_G x, \quad (24)$$

где x меняется от нуля на истоке до L на стоке транзистора.

Из уравнения (22) может быть рассчитана вся доступная информация о МОП-транзисторе с резистивным затвором.

Необходимо отметить, что ток сток—исток в соответствии с вышеприведенными уравнениями рассчитывается как отрицательная величина, так как направление тока соответствует уменьшению x (см. рис. 1).

Поведение тока в области слабой инверсии. Область слабой инверсии изучалась с целью исследования влияния резистивных затворов на существующую в этой области экспоненциальную зависимость между током стока и напряжением на затворе. Было заранее ясно, что использование резистивных затворов в этой рабочей области должно привести к увеличению диапазона допустимых значений порогового напряжения, поддерживающего ток в области слабой инверсии.

Наше определение области слабой инверсии РЗМОП-транзистора соответствует напряжению на затворе в области истока (V_{G1}), меньшему или равному пороговому напряжению (V_T) на истоке. Затворное напряжение на стоке транзистора (V_{G2}) может быть при этом выше или ниже порогового напряжения транзистора. Если V_{G2} больше порогового напряжения, то режим слабой

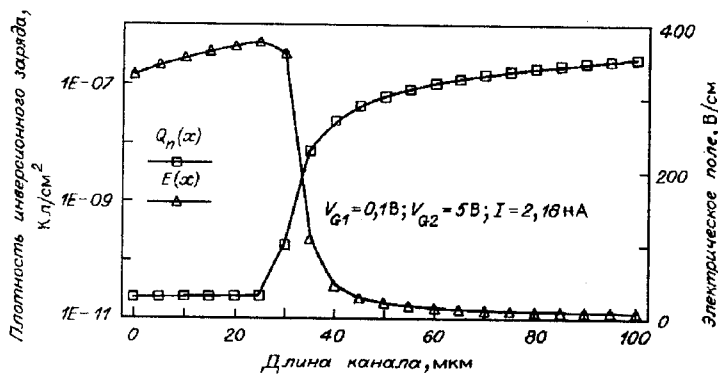


Рис. 2. Результаты расчета плотности инверсионного заряда $Q_n(x)$ и электрического поля $E(x)$ в канале МНОП-транзистора с резистивным затвором с двумя затворными контактами, работающими в области слабой инверсии около истока

инверсии определяется зоной канала около истока транзистора. Остальная часть канала может находиться в сильной инверсии будучи зависимой от величины V_{G2} .

Результаты расчета и эксперимента. Для определения полного тока методом численного интегрирования [7—9] был выполнен расчет всех компонент тока, поверхностного потенциала, падения напряжения, напряженности электрического поля и квазиуровней Ферми во всех точках вдоль канала транзистора.

Типичные результаты расчета представлены на рис. 2 и 3. Во всех расчетах V_T на истоке равнялось 0,2443 В. Следует отметить, что диффузионный ток для данных смещений на затворе представляется отрицательным для большей части канала, и это означает, что он течет от истока к стоку транзистора. Это связано с тем, что градиент Q_n имеет положительный наклон в данном частном случае, а в обычных транзисторах — отрицательный наклон от истока к стоку. Другая особенность — канал находится в области слабой инверсии только у истока, в то время как остальная часть канала располагается в области сильной инверсии.

Необходимо также отметить, что хотя результирующий полный ток через канал в этом случае мал, компоненты диффузионного и дрейфового токов относительно велики и могут течь в разных направлениях. Поток диффузионного тока от истока к стоку транзистора в этом случае связан с положительным наклоном Q_n в направлении стока транзистора.

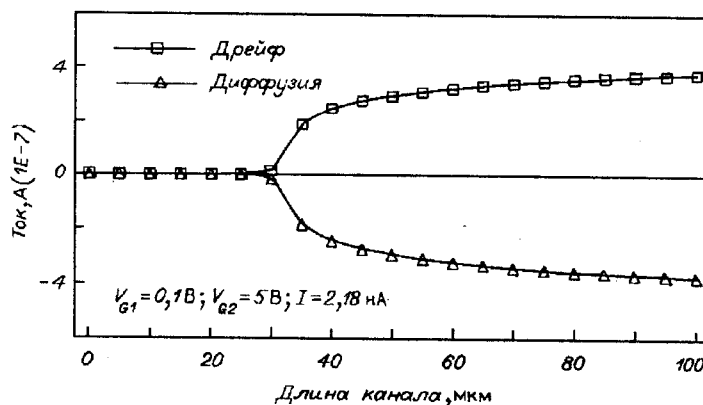


Рис. 3. Результаты расчета дрейфовой и диффузионной компонент тока сток—исток (I_D), протекающего в МНОП-транзисторе с резистивным затвором.

Режим работы соответствует области слабой инверсии у истока

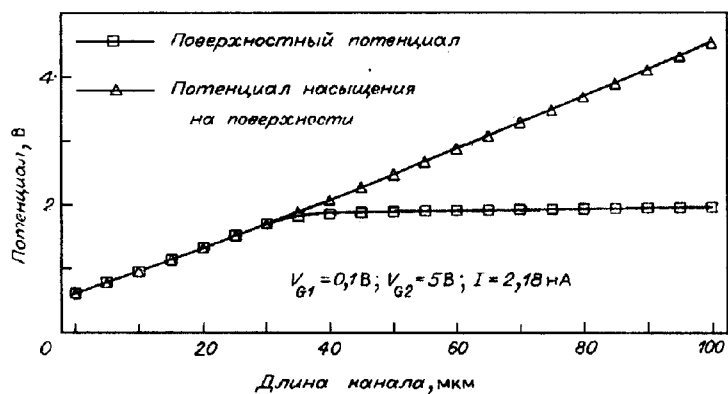


Рис. 4. Результаты расчета поверхностного потенциала и потенциала на поверхности в насыщении при работе МНОП-транзистора с резистивным затвором. Режим соответствует области слабой инверсии около истока

Из графика на рис. 4 следует, что поверхностный потенциал при насыщении Φ_{sat} почти равен поверхностному потенциалу в канале транзистора у истока. Если ток через транзистор возрастает на минимальную величину, транзистор будет находиться в насыщении и приведенные выше уравнения более не будут выполняться. Таким образом, ток в режиме слабой инверсии определяется минимизацией разницы между Φ_{sat} и Φ_s на стоке транзистора при условии, что Φ_s нигде в канале не становится больше чем Φ_{sat} .

На рис. 5 показано, что большая часть напряжения падает около истока, где Q_n очень мало. Градиент падения напряжения линейен, так как Q_n постоянен в этой области канала (см. рис. 2). Очень малое падение напряжения ожидается на остальной части канала, поскольку эта часть канала находится в области сильной инверсии. Подвижность, как и ожидалось, имеет низкое значение в области сильной инверсии канала и высокое — около истока транзистора.

Постоянный наклон падения напряжения около истока транзистора указывает на то, что транзистор, смещенный в эту рабочую область, будет вести себя как резистор, длина которого является функцией разности приложенных к затвору напряжений ($V_{G2} - V_{G1}$).

Результаты расчетов на рис. 6 указывают на квадратичную зависимость между током стока и разностью приложенных к затвору напряжений, когда V_{G1} соответствует предпороговой области слабой инверсии (область А), и линейную зависимость, когда V_{G1} приближается к пороговому напряжению (область В). Обе эти зависимости имеют место в широком диапазоне разности

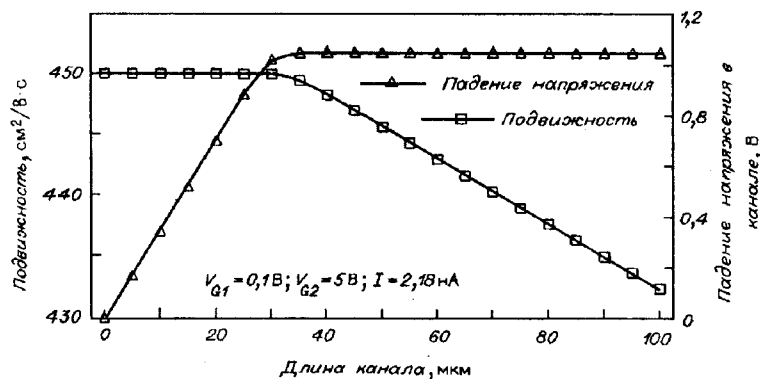


Рис. 5. Результаты расчета подвижности и падения напряжения в канале МНОП-транзистора с резистивным затвором, находящимся в режиме слабой инверсии у истока

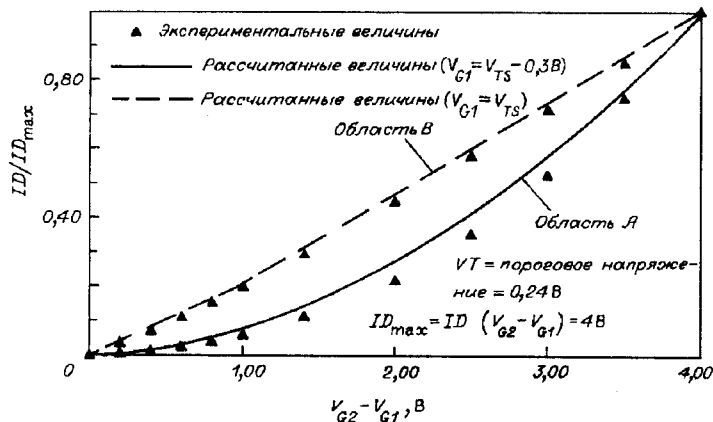


Рис. 6. Рассчитанные и экспериментальные зависимости тока стока—исток МНОП-транзистора с резистивным затвором от разности затворных напряжений, приложенных между двумя затворными контактами

затворных напряжений. Ток стока нормирован таким образом, чтобы обе кривые можно было сравнивать на одном графике. Линейная зависимость от разности затворных напряжений, когда V_{G1} равно V_{TS} (пороговому напряжению на истоке), отчетливо видна для значений $V_{G2} - V_{G1}$ выше 1 В (штриховая линия). Причина излома кривой при $V_{G2} - V_{G1} = 1$ В состоит в том, что V_{G2} в данной области смещений напряжения слишком мало, чтобы обеспечить сильную инверсию в канале около стока, а это, в свою очередь, приводит к большому падению напряжения вдоль канала. При низких значениях V_{G1} зависимость между током стока и разностью затворных напряжений становится параболической (сплошная линия).

Поведение МНОП-транзистора с резистивным затвором в области слабой инверсии проверялось экспериментально (см. рис. 6). Результаты также нормировались. Было получено хорошее согласие между рассчитанными и экспериментальными значениями.

Заключение. Исследовано поведение МНОП-транзисторов с резистивным затвором с двойным контактом на затворе в области слабой инверсии. Результаты расчета и эксперимента указывают на линейную или квадратичную зависимость между током стока и разностью затворных напряжений в широком диапазоне приложенных затворных напряжений в области слабой инверсии при постоянных значениях V_{G1} . Вблизи порогового напряжения и выше наблюдалась линейная зависимость тока стока от напряжения на затворе, в то время как в предпороговой рабочей области отмечена параболическая зависимость. Эти соотношения были получены при разности затворных напряжений вплоть до 4 В, т. е. расширена динамическая область затворных напряжений, соответствующих слабой инверсии.

Принято считать, что диффузионный ток доминирует в транзисторе, смещенном в предпороговую область. Однако нами показано, что в транзисторе с резистивным затвором, смещенным в предпороговую область, большой дрейфовый ток может течь по направлению к истоку в части канала, находящейся в сильной инверсии.

Применение РЗМОП-транзисторов, смещенных в рабочую область слабой инверсии, может обеспечить проектировщиков ИС полезными приборными характеристиками, такими как линейная зависимость тока стока от разности затворных напряжений, когда V_{G1} поддерживается постоянным в области V_{TS} , а V_{G2} изменяется.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Antagnetti P., Antoniadis D. A., Dutton R. W., Oldham W. G. Process and Device Simulation for MOS-VLSI Circuits. The Hague: Martinus Nijhoff Publishers, 1983.
2. Selberherr S., Schütz A., Pötl H. W. MINIMOS — a two-dimensional MOS transistor analyzer // IEEE Trans. Electron Devic. 1980. ED-27. P. 1540.
3. Kahng D. Applied Solid State Science. Suppl. 2. Silicon Integrated Circuits. P. A. L.: Academic, 1981. P. 2.
4. Nicollian E. H., Brews J. R. MOS (Metal Oxide Semiconductor) Physics and Technology. N. Y.: Wiley, 1982. P. 26.
5. Crawford R. H. MOSFET in Circuit Design. N. Y.: McGraw-Hill, 1967.
6. Sun S. C., Plummer J. D. Electron mobility in the inversion and accumulation layer on thermally oxidized silicon wafers // IEEE Trans. Electron Devic. 1980. ED-27. P. 1497.
7. Schieke P., du Plessis M. Simulation of the saturation current characteristics of a resistive gate MOS transistor as a function of lateral gate bias // Pres. at the Internat. Conf. Sci. and Technol. Electron Devic. Kruger National Park, South Africa, November 1992.
8. Schieke P., du Plessis M. The simulation of lateral gate bias effects on the channel current in a resistive gate NMOS transistor // Proc. NASECODE IX Conference. Colorado, USA, April 1993. P. 30.
9. Schieke P., du Plessis M. Lateral gate bias effects in resistive gate NMOS transistors // COMPEL — The Internat. J. Computation and Mathematics in Electrical and Electron. Eng. 1993. 12, N 4. P. 341.

Поступила в редакцию 28 декабря 1994 г.

Реклама продукции в нашем журнале — залог Вашего успеха!