

Размерный эффект в МОП-структурах при ионизирующем облучении

© О.В. Александров

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“,
197376 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: Aleksandr_ov@mail.ru

Поступила в Редакцию 16 декабря 2021 г.

В окончательной редакции 25 января 2022 г.

Принята к публикации 2 марта 2022 г.

Разработана количественная модель размерного эффекта — зависимости плотности поверхностных состояний от размеров затвора в МОП-структурах, подвергнутых воздействию ионизирующего облучения. Полагается, что размерный эффект обусловлен выходом наружу водорода, освобождаемого с водородосодержащих дырочных ловушек, через торцы двумерной МОП-структуры. Эффект описывается системой диффузионно-кинетических уравнений, решаемых совместно с уравнением Пуассона. Влияние технологических обработок и режимов термического окисления на величину эффекта связывается с различной концентрацией водородосодержащих ловушек в подзатворном оксиде. Показано, что основной вклад в эффект дает диффузия наружу нейтральных атомов водорода, ускоренная ионизирующим облучением.

Ключевые слова: ионизирующее облучение, МОП-структура, поверхностные состояния, размерный эффект, моделирование.

DOI: 10.21883/FTP.2022.06.52595.9786

1. Введение

При воздействии ионизирующего облучения (ИО) в МОП-структурах образуются объемный и поверхностный заряды, влияющие на пороговое напряжение, подвижность носителей в канале и крутизну вольт-амперных характеристик [1–3]. Как было показано в работах [4–8], при определенных условиях наблюдается размерный эффект — плотность поверхностных состояний (ПС), образующихся при ИО, увеличивается с размером затвора. Эффект проявлялся наиболее сильно при проведении операции вжигания Al перед фотолитографией при размере затвора $L_G > 30$ мкм и связывался с сохранением водорода под сплошным слоем металлизации [4]. Эффект зависел от режимов термического окисления, наблюдался при $L_G > 50$ мкм и объяснялся механическими напряжениями, возникающими при разрыве сплошности пленок на кремнии [5]. В работе [6] наблюдался рост плотности ПС при движении от края к центру МОП-структуры размером ~ 1 мм. Эффект связывался с ослаблением напряжений сжатия в оксиде при удалении от края структуры. Рост плотности ПС с увеличением диаметра структур от 250 мкм наблюдался в работе [7]. Эффект зависел от содержания трихлорэтана в кислороде при термическом окислении. При длительной выдержке МОП-структур в среде водорода перед ИО в работе [8] наблюдалось влияние ширины затвора на плотность ПС. Эффект объяснялся латеральной диффузией водорода в подзатворный оксид под поликремниевым затвором.

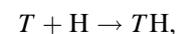
Таким образом, размерный при ИО эффект объяснялся либо выходом наружу из МОП-структуры (или приходом в МОП-структуру) водорода [4,8], либо изменением напряженности связей на межфазной границе

Si-SiO₂ [5,6]. Первый механизм представляется более предпочтительным, поскольку эффект зависит как от технологии выращивания подзатворного оксида [5,7], так и от последовательности технологических операций [4]. Количественных моделей размерного эффекта разработано не было.

Цель настоящей работы заключается в разработке количественной модели размерного эффекта при ИО МОП-структур на основе водородного механизма.

2. Реакции и уравнения модели

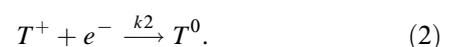
В технологическом цикле создания МОП-структур происходит насыщение подзатворного оксида водородом и образование в нем водородосодержащих ловушек:



где T — безводородная ловушка. При ИО в объеме оксида происходит генерация электронов и дырок. При захвате дырки безводородной дырочной ловушкой образуется положительный объемный заряд:

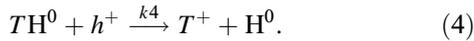


который частично нейтрализуется при захвате электрона:

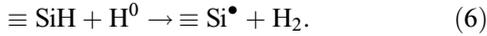
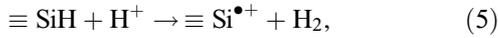


Дырки захватываются водородосодержащими ловушками, освобождая водород в ионизированном и нейтральном состояниях:





Освободившиеся атомы и ионы водорода мигрируют к межфазной границе (МФГ) Si-SiO₂, где депассивируют P_bH-центры (Si₃ ≡ Si[•]), образуя поверхностные состояния:



Для описания явлений при ИО МОП-структуры необходимо учитывать скорость генерации электронно-дырочных пар в объеме диэлектрика, диффузию и дрейф в электрическом поле подвижных носителей заряда (электронов и дырок), кинетику захвата дырок на ловушки и рекомбинации электронов с захваченными дырками, диффузию и дрейф атомарного и ионизованного водорода, влияние объемного заряда на распределение потенциала и напряженность электрического поля. Это достигается путем решения системы диффузионно-кинетических уравнений непрерывности совместно с уравнением Пуассона:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = D_p \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} - \mu_p \frac{\partial}{\partial x} (pE) - (k_1 C_T^0 + (k_3 + k_4) C_{TН}^0) p + G, \quad (7)$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} = D_n \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} + \mu_n \frac{\partial}{\partial x} (nE) - k_2 C_T^+ n + G, \quad (8)$$

$$\frac{\partial C_H^+}{\partial t} = D_H^+ \frac{\partial^2 C_H^+}{\partial x^2} + \mu_H^+ \frac{\partial}{\partial x} (C_H^+ E) + k_3 C_{TН}^0 p, \quad (9)$$

$$\frac{\partial C_H^0}{\partial t} = D_H^0 \frac{\partial^2 C_H^0}{\partial x^2} + k_4 C_{TН}^0 p, \quad (10)$$

$$\frac{\partial C_{TН}^0}{\partial t} = -(k_3 + k_4) C_{TН}^0 p, \quad (11)$$

$$\frac{\partial C_T^+}{\partial t} = (k_1 C_T^0 + k_4 C_{TН}^0) p, \quad (12)$$

$$\frac{\partial C_T^0}{\partial t} = k_2 C_T^+ n + k_3 C_{TН}^0 p, \quad (13)$$

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = -\frac{q}{\varepsilon \varepsilon_0} (C_T^+ + C_H^+ + p - n), \quad (14)$$

где x — координата, отсчитываемая от МФГ подзатворного диэлектрика с кремнием (при $x = 0$) до МФГ с затвором (при $x = d$, d — толщина подзатворного диэлектрика); t — время облучения; n и p — концентрации свободных электронов и дырок соответственно; D_n и μ_n — коэффициенты диффузии и подвижность электронов ($\mu_n = 20 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ [9]); D_p и μ_p — коэффициенты диффузии и подвижность дырок ($\mu_p = 2 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ [10]); D_H^+ и μ_H^+ — коэффициент диффузии и подвижность ионов H⁺ ($D_H^+ = 1.7 \cdot 10^{-13} \text{ см}^2/\text{с}$ при 300 К [11]); D_H^0 — коэффициент диффузии атомов водорода H⁰, V — распределение потенциала в диоксиде кремния, E — напряженность электрического поля, $E = -dV/dx$;

q — заряд электрона; ε — относительная диэлектрическая проницаемость диоксида кремния ($\varepsilon = 3.9$); ε_0 — электрическая постоянная, G — темп генерации электронно-дырочных пар. Темп генерации электронно-дырочных пар G определяется мощностью радиационной дозы F , коэффициентом генерации электронно-дырочных пар k_g и вероятностью $f_y(E)$ разделения пар электрическим полем до их начальной рекомбинации: $G(E) = F k_g f_y(E)$. Темп генерации рассчитывался по [12] при коэффициенте генерации электронно-дырочных пар $k_g = 1.3 \cdot 10^{-6} \text{ Кл} \cdot \text{см}^{-3}/\text{рад}$ при γ -облучении и $k_g = 1.4 \cdot 10^{-6} \text{ Кл} \cdot \text{см}^{-3}/\text{рад}$ при рентгеновском облучении.

Полагаем, что в начальный момент концентрации всех компонентов в оксиде нулевые:

$$n = p = C_T^0 = C_T^+ = C_H^0 = C_H^+ = 0, \quad (15)$$

кроме исходной концентрации нейтральных водородосодержащих дырочных ловушек, распределенных в SiO₂ вблизи МФГ Si-SiO₂ по экспоненциальному закону:

$$C_{TН}^0(x) = C_{TН0}^0 \exp\left(-\frac{x}{l}\right), \quad (16)$$

где $C_{TН0}^0$ — начальная концентрация водородосодержащих ловушек в SiO₂ на МФГ Si-SiO₂ при $x = 0$, $C_{TН0}^0 = Q_{TН0}^0/l$, $Q_{TН0}^0$ — начальное интегральное количество водородосодержащих ловушек в SiO₂, l — ширина распределения. При $l \ll d$ решение слабо зависит от величины l , полагалось $l = 4 \text{ нм}$, что лежит в диапазоне литературных значений 3–40 нм [13].

Граничные условия соответствуют нулевой концентрации свободных носителей на обеих межфазных границах при $x = 0$ и $x = d$:

$$p(0, t) = p(d, t) = n(0, t) = n(d, t) = 0. \quad (17)$$

Полагаем, что для ионов H⁺ граница с кремниевой подложкой — поглощающая, а с затвором — отражающая:

$$C_H^+(0, t) = 0; \quad \frac{\partial C_H^+(d, t)}{\partial x} = 0. \quad (18)$$

К затвору относительно подложки приложено напряжение V_G :

$$V(0, t) = 0; \quad V(d, t) = V_G. \quad (19)$$

При небольшом размере затвора свободный водород может покидать МОП-структуру вследствие латеральной диффузии и выхода наружу через торцы структуры. Таким образом, концентрация водорода оказывается функцией не только поперечной координаты x , но и продольной координаты y . Поведение водорода в продольном направлении описываем следующими диффузионно-кинетическими уравнениями:

$$\frac{\partial C_H^+}{\partial t} = D_H^+ \frac{\partial^2 C_H^+}{\partial y^2} + k_3 C_{TН}^0 p, \quad (20)$$

$$\frac{\partial C_H^0}{\partial t} = D_H^0 \frac{\partial^2 C_H^0}{\partial y^2} + k_4 C_{TH}^0 p. \quad (21)$$

Полагается, что в продольном направлении градиента поля нет, поэтому в (20) отсутствует дрейфовый член. Координату y отсчитываем от середины затвора ($y = 0$), где имеем для свободного водорода отражающую границу:

$$\frac{\partial C_H^+}{\partial y} = \frac{\partial C_H^0}{\partial y} = 0. \quad (22)$$

На торце структуры при $y = L_G/2$ (L_G — ширина затвора) полагаем поглощающую границу:

$$C_H^+(y, t) = C_H^0(y, t) = 0. \quad (23)$$

Полагаем, что все атомы и ионы водорода, стекающие на МФГ Si-SiO₂, депассивируют P_b -Н-центры по реакциям (5), (6), образуя поверхностные состояния. Плотность ПС определяется суммарным потоком свободного водорода на МФГ Si-SiO₂ при $x = 0$, а также интегральным количеством дырок, генерируемых в пограничном слое, которые идут на образование ПС (по модели [14]):

$$n_{it} = \int_0^t \left\{ J_H^+(0, t) + j_H^0(0, t) + k_G \int_0^l G(x) dx \right\} dt, \quad (24)$$

где k_G — доля дырок в пограничном слое, идущих на образование ПС ($k_G \leq 1$).

Выход свободного водорода с торца структуры приводит к неоднородному распределению плотности ПС по ширине затвора, поэтому проводилось усреднение по продольной координате y :

$$N_{it} = \frac{2}{l} \int_0^{l/2} n_{it}(y) dy. \quad (25)$$

Сдвиг порогового напряжения под действием ПС:

$$\Delta V_{it} = -Q_{it}/C_{ox}, \quad (26)$$

где C_{ox} — удельная емкость оксида, $C_{ox} = \epsilon \epsilon_0/d$, Q_{it} — заряд ПС, полагали, что $Q_{it} = qN_{it}$.

Параметрами модели, помимо исходной концентрации водородосодержащих ловушек, являются константы скоростей реакций (1)–(4): $k_{1,3,4} = \sigma_{p1,3,4} v_{th} D_p / D_n$; $k_2 = \sigma_{n2} V_{th}$, где σ_p и σ_n — сечения захвата дырок и электронов, соответственно, v_{th} — тепловая скорость электронов, $v_{th} \approx 10^7$ см/с. Учитывалась зависимость от напряженности электрического поля сечений захвата дырок и электронов по [15,16] при значениях сечения захвата в слабых полях ($E < 10^5$ В/см) дырок $\sigma_{p01} = \sigma_{p04} = 1.4 \cdot 10^{-14}$ см², $\sigma_{p03} = 1.4 \cdot 10^{-15}$ см² и электронов $\sigma_{n02} = 1.6 \cdot 10^{-12}$ см². Коэффициент диффузии атомов водорода D_H^0 подбирался по соответствию экспериментальным данным. Варьируемым параметром являлась начальная концентрация водородосодержащих ловушек на МФГ Si-SiO₂ C_{TH0}^0 или начальное интегральное количество водородосодержащих ловушек Q_{TH0}^0 , зависящих от технологии изготовления МОП-структур.

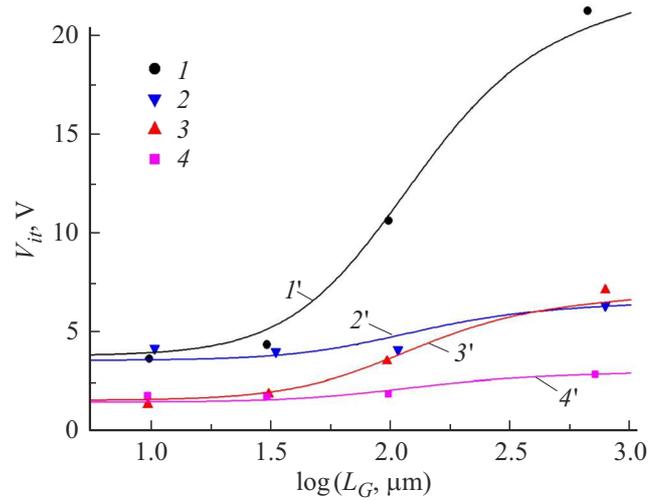


Рис. 1. Зависимость V_{it} от ширины затвора L_G : 1, 1', 2, 2' — при $V_G = +10$ В; 3, 3', 4, 4' — при $V_G = -10$ В; 1, 1', 3, 3' — вжигание Al до ФЛ; 2, 2', 4, 4' — вжигание Al после ФЛ; 1–4 — эксперимент [4], 1'–4' — расчет при C_{TH0}^0 , см⁻³: 1' — $7.5 \cdot 10^{20}$, 2' — $3.8 \cdot 10^{19}$, 3' — $5.5 \cdot 10^{20}$, 4' — $2.2 \cdot 10^{19}$; $k_G = 0.9$ при $V_G = +10$ В, $k_G = 0.5$ при $V_G = -10$ В; $D_H^0 = 2.4 \cdot 10^{-6}$ см²/с ($D = 10^5$ рад, $F = 80$ рад/с, $d = 150$ нм).

3. Расчеты по модели

Уравнения (7)–(14) и (20), (21) решались по неявной и явной разностным схемам при начальных условиях (15), (16), граничных условиях (17)–(19) и (22), (23) с учетом (24)–(26). Результаты расчетов сравнивались с данными экспериментов [4,5].

В работе [4] МОП-структуры с поликремниевым затвором и толщиной оксида 150 нм подвергались γ -облучению ⁶⁰Co с дозой $D = 10^5$ рад при интенсивности $F = 80$ рад/с. Ширина затвора составляла 10, 30, 100 и 714 мкм при одинаковой площади $4 \cdot 10^5$ мкм². После нанесения металлизации операция вжигания Al при 450°C проводилась либо до, либо после операции фотолитографии (ФЛ). Во время облучения на затворы структур подавалось смещение $V_G = +10$ В и $V_G = -10$ В. Экспериментальные данные показаны на рис. 1 значками 1–4. Как видно из рисунка, размерный эффект в случае вжигания Al до ФЛ (1, 3) проявляется сильнее, чем в случае вжигания Al после ФЛ (2, 4). Расчетные зависимости (рис. 1, кривые 1'–4') построены при значениях начальной концентрации водородосодержащих ловушек в первом случае $C_{TH0}^0 = Q_{TH0}^0/l = 7.5 \cdot 10^{20}$ и $5.5 \cdot 10^{20}$ см⁻³, а во втором — $C_{TH0}^0 = 3.8 \cdot 10^{19}$ и $2.2 \cdot 10^{19}$ см⁻³ при $V_G = +10$ В и $V_G = -10$ В соответственно. Более высокая концентрация водородосодержащих ловушек в первом случае связана с сохранением высокой концентрации водорода, образовавшегося при вжигании Al под сплошным слоем металлизации. Во втором случае — при вжигании Al после ФЛ — значительная доля водорода покидает МОП-структуры.

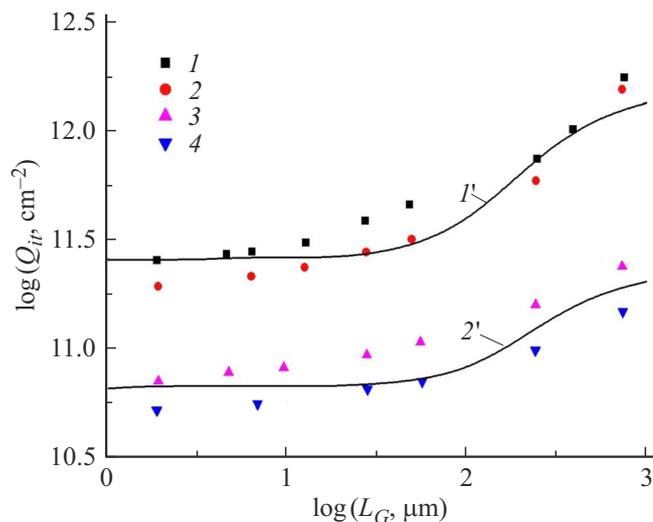


Рис. 2. Зависимость V_{it} от ширины затвора L_G при $V_G = 0$; 1–4 — эксперимент [5]: 1 — 1100°C, сухой O_2 ; 2 — 900°C, пар H_2O ; 3 — 1000°C, сухой O_2 ; 4 — 900°C, сухой O_2 ; 1', 2' — расчет при $Q_{TН0}^0, \text{см}^{-2}$: 1' — $2.1 \cdot 10^{12}$, 2' — $2.5 \cdot 10^{11}$, при k_G : 1' — 0, 2' — 0.1; $D_H^0 = 3.8 \cdot 10^{-5} \text{см}^2/\text{с}$ ($D = 1.5 \cdot 10^6 \text{рад}$, $F = 830 \text{рад/с}$, $d = 80 \text{нм}$).

Расчеты показывают, что размерный эффект, начинающийся при $L_G > 30 \mu\text{м}$, обеспечивается в основном диффузией более подвижного нейтрального водорода с коэффициентом диффузии $D_H^0 = 2.4 \cdot 10^{-6} \text{см}^2/\text{с}$.

В работе [5] МОП-структуры с Al затвором и толщиной оксида 80 нм подвергались рентгеновскому облучению (10 кэВ) дозой $D = 1.5 \cdot 10^6 \text{рад}$ при интенсивности $F = 830 \text{рад/с}$. Во время облучения смещение на затвор не подавалось ($V_G = 0$). Ширина затвора изменялась от 2 до 750 мкм. Варьировались температура и среда термического окисления при выращивании подзатворного оксида. Экспериментальные данные показаны на рис. 2 значками 1–4. Расчетные зависимости (рис. 2, кривые 1', 2') построены при значениях начального интегрального количества водородосодержащих ловушек $Q_{TН0}^0 = 2.1 \cdot 10^{12} \text{см}^{-2}$ (1100°C, сухой O_2 и 900°C, пар H_2O) и $2.5 \cdot 10^{11} \text{см}^{-2}$ (1000°C, сухой O_2 и 900°C, сухой O_2) соответственно. Удовлетворительное соответствие с экспериментом достигается при $D_H^0 = 3.8 \cdot 10^{-5} \text{см}^2/\text{с}$. Как и в предыдущем случае, размер затвора практически не оказывал влияния на объемный заряд МОП-структуры.

Отметим, что полученные в расчетах коэффициенты диффузии нейтрального водорода превышают литературные значения $D_H^0 = 10^{-7} - 10^{-6} \text{см}^2/\text{с}$ при 300 К, приводимые в работах [17,18]. Превышение увеличивается при возрастании мощности дозы ИО от $F = 80 \text{рад/с}$ в эксперименте [4] до $F = 830 \text{рад/с}$ в эксперименте [5]. Этот результат можно объяснить ускорением процесса транспорта нейтрального водорода в структуре аморфного SiO_2 под воздействием ионизирующего облучения.

4. Заключение

Разработана количественная модель размерного эффекта в МОП-структурах, подвергнутых ИО. Полагается, что размерный эффект обусловлен выходом наружу водорода, освобождаемого с водородосодержащих дырочных ловушек, через торцы двумерной МОП-структуры. Эффект описывается системой диффузионно-кинетических уравнений, решаемых совместно с уравнением Пуассона. Влияние последовательности технологических обработок и режимов термического окисления на величину эффекта в рамках модели связывается с различной концентрацией водородосодержащих ловушек в подзатворном оксиде после этих операций. Показано, что основной вклад в эффект дает ускоренная ионизирующим облучением диффузия наружу нейтральных атомов водорода.

Конфликт интересов

Автор заявляет, что у него нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] К.И. Таперо, В.Н. Улимов, А.М. Членов. *Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах космического применения* (М., БИНОМ, 2012).
- [2] В.С. Першенков, В.Д. Попов, А.В. Шальнов. *Поверхностные радиационные эффекты в ИМС* (М., Энергоатомиздат, 1988).
- [3] T.R. Oldham. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **50** (3), 483 (2003).
- [4] Ю.В. Федорович, Л.К. Думиш, В.А. Лепилин, А.Д. Поляков. *Электрон. техн.*, сер. 2, вып. 5 (164), 15 (1983).
- [5] M.R. Chin, T.P. Ma. *Appl. Phys. Lett.*, **42** (10), 883 (1983).
- [6] V. Zekeriya, A. Wong, T.P. Ma. *Appl. Phys. Lett.*, **46** (1), 80 (1985).
- [7] Yu Wang, Y. Nishioka, T.P. Ma, R.C. Barker. *Appl. Phys. Lett.*, **52** (7), 573 (1988).
- [8] N.S. Saks, R.B. Klein, R.E. Stahlbush, B.J. Mrstik, R.W. Rendell. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **40** (6), 1341 (1993).
- [9] R.C. Hughes. *Phys. Rev. Lett.*, **30** (26), 1333 (1973).
- [10] R.C. Hughes. *Phys. Rev. B*, **15** (4), 2012 (1977).
- [11] S.R. Hofstein. *IEEE Trans. Electron Dev.*, **11** (11), 749 (1967).
- [12] J.M. Benedetto, H.E. Boesch. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **33** (6), 1318 (1986).
- [13] О.В. Александров. *ФТП*, **49** (6), 793 (2015).
- [14] О.В. Александров, С.А. Мокрушина. *ФТП*, **54** (2), 189 (2020).
- [15] R.J. Krantz, L.W. Aukerman, T.C. Zietlow. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **34** (6), 1196 (1987).
- [16] H.E. Boesch, F.B. McLean, J.M. Benedetto, J.M. McGarrity. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **33** (6), 1191 (1986).
- [17] D.L. Griscom. *J. Appl. Phys.*, **58** (7), 2524 (1985).
- [18] I.A. Shkrob, A.D. Trifunac. *Phys. Rev. B*, **54** (21), 15073 (1996).

Редактор Г.А. Оганесян

Dimensional effect in MOS-structures under ionizing irradiation

O.V. Aleksandrov

St. Petersburg State Electrotechnical University „LETI“,
197376 St. Petersburg, Russia

Abstract A quantitative model of the dimensional effect — dependence of surface states on the gate size in MOS-structures subjected to ionizing irradiation has been developed. It is assumed that the dimensional effect is due to the exodus of hydrogen released from hydrogen-containing hole traps through the butt-ends of a two-dimensional MOS-structure. The effect is described by a system of diffusion-kinetic equations solved together with the Poisson equation. The influence of technological treatments and regimes of thermal oxidation on the magnitude of the effect is associated with different concentrations of hydrogen-containing traps in the gate oxide. It is shown that the main contribution to the effect is the accelerated by ionizing irradiation out-diffusion of neutral hydrogen atoms.