

Модель накопления зарядов в *n*- и *p*-МОП-транзисторах при туннельной инжекции электронов из затвора

© О.В. Александров, С.А. Мокрушина

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

E-mail: Aleksandr_ov@mail.ru

(Получена 28 августа 2017 г. Принята к печати 20 сентября 2017 г.)

Разработана количественная модель накопления зарядов в подзатворном диэлектрике при туннельной инжекции электронов из затвора по механизму Фаулера–Нордгейма. В модели учитывается захват электронов и дырок на безводородные и водородосодержащие ловушки, а также генерация поверхностных состояний при взаимодействии дырок с водородосодержащими центрами. На основе модели проанализированы экспериментальные зависимости сдвигов порогового напряжения и напряжения на затворе *n*- и *p*-канальных МОП-транзисторов от инжектируемого заряда в режиме постоянного тока.

DOI: 10.21883/FTP.2018.06.45929.8717

1. Введение

При приложении напряжения в МОП-структурах наблюдается образование положительного и(или) отрицательного зарядов в объеме диэлектрика, а также поверхностных состояний на межфазных границах [1]. Заряды влияют на распределение электрического поля, пороговое напряжение и крутизну МОП-транзисторов, а также на пробой подзатворного диэлектрика [2]. Образование отрицательного заряда в объеме SiO₂ объясняется туннельной инжекцией электронов по Фаулеру–Нордгейму из катода (затвора или подложки) в диэлектрик с последующим их захватом на электронные ловушки [3,4]. Электронные ловушки связываются обычно с присутствием фрагментов воды и групп ОН в структуре диоксида кремния [1,3,4].

Образованию отрицательного заряда при туннельной инжекции электронов часто предшествует образование положительного заряда. Положительный заряд наблюдается, как правило, вблизи межфазной границы (МФГ) Si–SiO₂ при наличии горячих электронов в зоне проводимости SiO₂ [5]. По поводу происхождения положительного заряда при туннельной инжекции электронов предложен ряд моделей [6–12]. В этих моделях образование положительного объемного заряда связывалось с низкоподвижными дырками, образующимися вместе с высокоподвижными электронами в результате межзонной ударной ионизации [6], ударной ионизацией мелких ловушек SiO₂ [7–10], захватом дырок, образующимися при межзонной ударной ионизации в составе электронно-дырочных пар, на дырочные ловушки [10–12]. Дырочные ловушки связываются с наличием вблизи МФГ Si–SiO₂ кислородных вакансий (*E'*-центров), а также их комплексов с водородом [13].

Отметим, что межзонная ударная ионизация требует высокой энергии электронов и может происходить только при высоких полях ($E > 8–10$ МВ/см). При меньших полях ($E > 5$ МВ/см) дырки могут генерироваться в

материале анода и туннелировать в SiO₂ по механизму анодной дырочной инжекции (АДИ) [14,15].

Наряду с объемными зарядами при туннельной инжекции электронов могут вводиться поверхностные состояния (ПС) [1]. Образование ПС в моделях [16,17] связывалось с рекомбинацией электрона с дыркой, захваченной вблизи МФГ Si–SiO₂. Имеются, однако, убедительные результаты, указывающие на участие водорода в образовании ПС при инжекции как электронов [3], так и дырок [18]. В модели [19] свободный водород образуется при взаимодействии инжектируемых электронов с комплексами SiH. Отметим, что эффективность генерации ПС при инжекции дырок на несколько порядков выше, чем при инжекции электронов [20,21].

В настоящей работе разработана количественная модель накопления заряда в подзатворном диэлектрике *n*- и *p*-канальных МОП-транзисторов при туннельной инжекции электронов из затвора, учитывающая захват на ловушки инжектируемых электронов и генерируемых дырок, а также образование ПС при взаимодействии дырок с водородосодержащими центрами.

2. Эксперимент

Исследовались *n*- и *p*-канальные МОП-транзисторы, изготовленные на кремниевых структурах ориентации (100) с диэлектрической изоляцией (КСДИ) в карманах *p*- и *n*-типа соответственно. Подзатворный диэлектрик SiO₂ толщиной $d_{ox} = 120$ нм создавался термическим окислением при температуре 1000°С в сухом кислороде с добавлением HCl. Поликристаллический затвор легировался фосфором путем диффузии при температуре 900°С. Инжекция электронов в оксид осуществлялась путем подачи отрицательного напряжения на затвор относительно подложки ($V_g = -80 \dots -100$ В) в режиме постоянного тока $I = 0.5$ нА, что при площади затвора металл–оксид–полупроводник–транзистора *p*-МОПТ $1.5 \cdot 10^{-5}$ см² соответствует потоку электронов

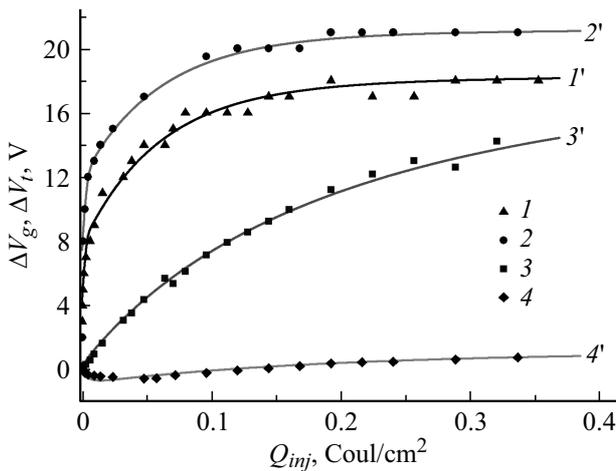


Рис. 1. Зависимости от инжектируемого заряда $|\Delta V_g|$ p -МОПТ (1, 1'), $|\Delta V_g|$ n -МОПТ (2, 2'), $|\Delta V_i|$ p -МОПТ (3, 3') и ΔV_i n -МОПТ (4, 4'). 1–4 — эксперимент, 1'–4' — расчет.

$j = 2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, а при площади затвора n -МОПТ $1 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2$ соответствует $j = 3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Изменялись сдвиги напряжения на затворе (ΔV_g) и порогового напряжения (ΔV_i) в зависимости от времени и заряда инжекции. Типовые зависимости $\Delta V_g(Q_{inj})$ (значки 1, 2) и $\Delta V_i(Q_{inj})$ (значки 3, 4) p -канальных (значки 1, 3) и n -канальных (значки 2, 4) МОП-транзисторов показаны на рис. 1.

На обоих типах МОП-транзисторов наблюдается отрицательный сдвиг напряжения затвора ΔV_g . Зависимости сдвига напряжения затвора $\Delta V_g(Q_{inj})$ показывают сначала быстрый, а затем более медленный рост с насыщением при больших зарядах инжекции. Этот результат можно объяснить захватом инжектируемых электронов на ловушки двух типов — с большим и малым сечением захвата. Насыщение свидетельствует об отсутствии генерации новых электронных ловушек. Отметим, что образование отрицательного заряда вблизи затвора не вызывает положительный сдвиг порогового напряжения на p - и n -канальных транзисторах, что свидетельствует о высокой степени локализации заряда у затвора.

Сдвиг порогового напряжения $\Delta V_i(Q_{inj})$ для p -канальных транзисторов отрицателен, что свидетельствует о введении положительного заряда вблизи подложки. Для n -канальных транзисторов сдвиг порогового напряжения значительно меньше, чем для p -канальных. Этот результат можно объяснить введением на межфазной границе (МФГ) Si–SiO₂ поверхностных состояний (ПС), которые заряжены в соответствии с изгибом зон — положительно в p -канальных транзисторах и отрицательно в n -канальных транзисторах. Соответственно объемный заряд и заряд ПС в первом случае суммируются, а во втором вычитаются. Отметим, что в n -канальных транзисторах наблюдается смена знака порогового напряжения — сначала сдвиг $\Delta V_i(Q_{inj})$ отрицательный, а с увеличением заряда инжекции становится положительным,

что свидетельствует о преобладании вблизи подложки сначала положительного заряда, а затем отрицательного.

3. Уравнения модели

При приложении отрицательного напряжения к затвору МОП-структуры через подзатворный оксид начинает протекать электронный ток туннелирования по механизму Фаулера–Нордгейма [22],

$$I_n = AE_c^2 \exp(-B/E_c),$$

где E_c — напряженность электрического поля вблизи затвора (катода), A и B — постоянные, определяемые эффективной массой электрона в диоксиде кремния и высотой потенциального барьера SiO₂-затвор ($m_{ox} = 0.5 m_e$, $\phi = 3.2 \text{ эВ}$ для n^+ -поликристаллического затвора [23]). Инжектированные из катода электроны ускоряются в электрическом поле диэлектрика и приобретают энергию, достаточную для генерации дырок в составе электронно-дырочных пар в процессе ударной ионизации в материале анода (по механизму АДИ) или в объеме диэлектрика (по механизму межзонной ударной ионизации).

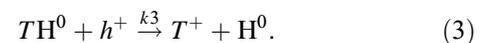
Образование отрицательного заряда вблизи катода объясняем захватом инжектированных из катода электронов на нейтральные ловушки двух типов R^0 и S^0 с образованием соответственно отрицательно заряженных центров R^- ,



и отрицательно заряженных центров S^- ,



Генерацию поверхностных состояний при туннельной инжекции (так же, как и при ионизирующем облучении [24]) связываем с наличием в объеме оксида водородосодержащих дырочных ловушек $T\text{H}^0$. При захвате дырок происходит развал этих центров с образованием положительно заряженных центров T^+ и освобождением нейтрального водорода H^0 ,



Положительно заряженные безводородные центры T^+ дают положительный объемный заряд, а освободившиеся нейтральные атомы водорода, диффундируя к МФГ Si–SiO₂, образуют (депассивируют) ПС по известной реакции [25]:



где P_b — центр, обусловленный обрывом кремниевой связи ($\text{Si}_3 \equiv \text{Si}\bullet$) на МФГ Si–SiO₂. Положительно заряженные безводородные центры T^+ могут нейтрализоваться при захвате электронов,



и снова заряжаться положительно при захвате дырок,

$$T^0 + h^+ \xrightarrow{k^5} T^+. \quad (6)$$

Дырки могут нейтрализовать часть отрицательно заряженных центров обоих типов:

$$R^- + h^+ \xrightarrow{k^6} R^0, \quad (7)$$

$$S^- + h^+ \xrightarrow{k^7} S^0. \quad (8)$$

Процесс накопления заряда в подзатворном диэлектрике при туннельной инжекции электронов в соответствии с реакциями (1)–(8) описываем следующими диффузионно-кинетическими уравнениями непрерывности и уравнением Пуассона:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = D_p \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} - \mu_p \frac{\partial}{\partial x} (pE) - (k_3 C_{TH}^0 - k_5 C_T^0 - k_6 C_R^- - k_7 C_S^-) p, \quad (9)$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} = D_n \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} + \mu_n \frac{\partial}{\partial x} (nE) - (k_1 C_R^0 - k_2 C_S^0) n, \quad (10)$$

$$\frac{\partial C_H^0}{\partial t} = D_H^0 \frac{\partial^2 C_H^0}{\partial x^2} + k_3 C_{TH}^0 p, \quad (11)$$

$$\frac{\partial C_T^+}{\partial t} = k_3 C_{TH}^0 p - k_4 C_T^+ n, \quad (12)$$

$$\frac{\partial C_T^0}{\partial t} = k_4 C_T^+ n - k_5 C_T^0 p, \quad (13)$$

$$\frac{\partial C_{TH}^0}{\partial t} = -k_3 C_{TH}^0 p, \quad (14)$$

$$\frac{\partial C_R^-}{\partial t} = -\frac{\partial C_R^0}{\partial t} = k_1 C_R^0 n - k_6 C_R^- p, \quad (15)$$

$$\frac{\partial C_S^-}{\partial t} = -\frac{\partial C_S^0}{\partial t} = k_2 C_S^0 n - k_7 C_S^- p, \quad (16)$$

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = -\frac{q}{\varepsilon \varepsilon_0} (p + C_T^+ - C_R^- - C_S^- - n), \quad (17)$$

где x — координата, отсчитываемая от границы диоксида с кремнием при $x = 0$ до границы с затвором при $x = d$; t — время инжекции; n и p — концентрации свободных электронов и дырок в SiO_2 соответственно; D_n и D_p — коэффициенты диффузии электронов и дырок в SiO_2 соответственно ($D_n = 0.5 \text{ см}^2/\text{с}$, $D_p = 1 \cdot 10^{-7} \text{ см}^2/\text{с}$); μ_n и μ_p — подвижности электронов и дырок соответственно; C_H^0 — концентрация водорода; C_R^0 , C_S^0 , C_R^- и C_S^- — концентрации нейтральных и отрицательно заряженных электронных ловушек, C_T^+ и C_T^0 — концентрации нейтральных и положительно заряженных безводородных дырочных ловушек, C_{TH}^0 — концентрация нейтральных водородосодержащих дырочных ловушек; V — распределение электрического потенциала в диоксиде кремния, E — напряженность электрического поля в диэлектрике, $E = -dV/dx$; q — заряд электрона; ε — относительная диэлектрическая проницаемость диоксида кремния ($\varepsilon = 3.9$); ε_0 — диэлектрическая постоянная.

Уравнения (9)–(15) решались при следующих граничных условиях. Поток электронов из катода определяется током туннелирования Фаулера–Нордгейма при напряженности электрического поля вблизи катода E_c (при $x = d$):

$$j_n(d, t) = I_n(E_c)/q. \quad (18)$$

Поток дырок из анода определяется напряженностью электрического поля вблизи анода E_a (при $x = 0$):

$$j_p(0, t) = \alpha_p(E_a) I_n(E_c)/q, \quad (19)$$

где α_p — отношение дырочного тока I_p к электронному, зависящее от напряженности электрического поля вблизи анода E_a и от толщины подзатворного оксида [14,17,26]. При толщинах выше 70 нм α_p перестает зависеть от толщины подзатворного SiO_2 [17]. Зависимость $\alpha_p(E_a)$ для таких пленок, по данным [17], удовлетворительно аппроксимируется экспоненциальной $1/E$ зависимостью:

$$\alpha_p(E_a) = \alpha_0 \exp\left(-\frac{\beta}{E_a}\right), \quad (20)$$

где $\alpha_0 = 2.72 \cdot 10^3$, $\beta = 107 \text{ МВ/см}$. Граница диэлектрика с анодом полагается поглощающей для электронов, а граница диэлектрика с катодом поглощающей для дырок,

$$n(0, t) = p(d, t) = 0, \quad (21)$$

и отражающей для водорода,

$$j_H^0(d, t) = -D_H^0 \frac{\partial C_H^0(d, t)}{\partial x} = 0. \quad (22)$$

К затвору относительно подложки приложено такое напряжение V_g , которое обеспечивает заданный постоянный ток затвора:

$$V(0, t) = 0; \quad V(d, t) = V_g(j_n). \quad (23)$$

Полагаем, что в начальный момент времени концентрации всех компонентов нулевые,

$$n(x, 0) = p(x, 0) = C_R^-(x, 0) = C_S^-(x, 0) = C_T^+(x, 0) = 0, \quad (24)$$

кроме исходных концентраций нейтральных электронных ловушек, безводородных и водородосодержащих дырочных ловушек. Полагаем, что электронные ловушки располагаются вблизи поликремниевого затвора, а дырочные ловушки вблизи кремниевой подложки и их концентрации спадают экспоненциально в глубь диэлектрика:

$$C_R^0(x) = Q_{R0}^0 \exp[(x-d)/L_R]/L_R, \quad (25)$$

$$C_S^0(x) = Q_{S0}^0 \exp[(x-d)/L_S]/L_S, \quad (26)$$

$$C_T^0(x) = Q_{T0}^0 \exp[-(x-h)/L_T]/L_T, \quad (27)$$

$$C_{TH}^0(x) = Q_{TH0}^0 \exp[-(x-h)/L_{TH}]/L_{TH}, \quad (28)$$

где Q_{R0}^0 и Q_{S0}^0 — полные концентрации нейтральных электронных ловушек R^0 и S^0 вблизи поликремниевого затвора, Q_{T0}^0 и Q_{TH0}^0 — полные концентрации

нейтральных безводородных T^0 и водородосодержащих TN^0 дырочных ловушек вблизи подложки, h — толщина слоя, свободного от дырочных ловушек, L — ширина распределения ловушек. Полагали $h = 2$ нм, $L_R = L_S = L_T = L_{TH} = 1.2$ нм [27].

Сдвиг порогового напряжения ΔV_i складывается из объемной (ΔV_{ot}) и поверхностной (ΔV_{it}) составляющих:

$$\Delta V_i = \Delta V_{ot} + \Delta V_{it} = -(Q_{ot} + Q_{it})/C_{ox}, \quad (29)$$

где Q_{ot} — эффективный объемный заряд, приведенный к внутренней МФГ Si–SiO₂; Q_{it} — заряд на ПС; C_{ox} — удельная емкость диэлектрика, $C_{ox} = \epsilon\epsilon_0/d$. Эффективный объемный заряд рассчитывается по формуле:

$$Q_{ot} = \frac{1}{d} \int_0^d \rho(x)(d-x)dx, \quad (30)$$

где $\rho(x)$ — плотность объемного заряда, $\rho(x) = q[C_T^+(x) + p(x) - C_R^-(x) - C_S^-(x) - n(x)]$.

Полагаем, что количество образующихся ПС определяется потоком нейтрального водорода на МФГ Si–SiO₂,

$$j_H^0(0, t) = -D_H^0 \frac{\partial C_H^0(0, t)}{\partial x}, \quad (31)$$

т. е. каждый атом водорода, стекающий на МФГ Si–SiO₂, приводит к образованию (депассивации) одного ПС:

$$N_{it} = \int_0^t j_H^0(0, t)dt. \quad (32)$$

Заряд на ПС зависит от поверхностного потенциала φ_s , уровня и типа легирования кремниевой подложки, а также от распределения ПС по энергиям. Было показано [28], что плотность распределения ПС по энергии при инжекции электронов имеет максимум при $E_V + 0.45$ эВ, а при инжекции дырок — при $E_V + 0.75$ эВ, т. е. лежит в пределах $\pm\varphi_b$ (φ_b — объемный потенциал) от середины запрещенной зоны кремния. В этом случае при измерении порогового напряжения, когда выполняется условие сильной инверсии ($\varphi_s = 2\varphi_b$), можно считать, что

$$Q_{it} \approx \pm qN_{it}, \quad (33)$$

где знак „+“ соответствует каналу p -типа, а знак „–“ соответствует каналу n -типа.

Сдвиг напряжения затвора при инжекции рассчитывался с помощью выражения

$$\Delta V_g = Q_{og}/C_{ox}, \quad (34)$$

где Q_{og} — эффективный объемный заряд, приведенный к внешней МФГ SiO₂-затвор,

$$Q_{og} = \frac{1}{d} \int_0^d \rho(x)xdx, \quad (35)$$

Параметрами модели, помимо исходных концентраций электронных и дырочных ловушек, являются константы скоростей реакций (1)–(8), которые при диффузионном ограничении определяются скоростями диффузии подвижных компонентов: $k_1 = \sigma_{n1}^0 V_{th}$, $k_2 = \sigma_{n2}^0 V_{th}$, $k_3 = \sigma_{p3}^0 V_{th} D_p / D_n$, $k_4 = \sigma_{n4}^+ V_{th}$, $k_5 = \sigma_{p5}^0 V_{th} D_p / D_n$, $k_6 = \sigma_{p6}^- V_{th} D_p / D_n$, $k_7 = \sigma_{p7}^- V_{th} D_p / D_n$, где V_{th} — тепловая скорость электронов, $V_{th} \cong 10^7$ см/с. Учитывались зависимости от напряженности электрического поля сечений захвата дырок в виде [29,30]

$$\sigma_{p0}^0(E) = \sigma_{p0}^0(1 + 1.9 \cdot 10^{-4} E^{0.55})^{-1}, \quad (36)$$

$$\sigma_p^-(E) = 6.0 \cdot 10^{-10} E^{-0.6} \quad (37)$$

и сечений захвата электронов в виде [31]

$$\sigma_n^+(E) = \sigma_{n0}^+(1 + 8.3 \cdot 10^{-9} E^{1.5})^{-1}$$

при $E \leq 7 \cdot 10^5$ В/см,

$$\sigma_n^+(E) = \sigma_{n0}^+(1 + 8.7 \cdot 10^{-17} E^{2.865})^{-1}$$

при $E > 7 \cdot 10^5$ В/см, (38)

где σ_{p0}^0 и σ_{n0}^+ — сечения захвата дырок на нейтральные ловушки и электронов на положительно заряженные ловушки, соответственно, в слабых полях.

4. Расчеты по модели и их обсуждение

Система уравнений модели (9)–(17) с граничными условиями (18)–(23), начальными условиями (24)–(28), с учетом (29)–(38) решалась численно с использованием неявной разностной схемы при задании постоянного тока инжекции. Решения (сплошные линии 1'–4' на рис. 1) сравнивались с экспериментальными зависимостями (значки 1–4 на рис. 1). Соответствие решений экспериментальным зависимостям $\Delta V_g(Q_{inj})$ (значки 1, 2) и $\Delta V_i(Q_{inj})$ (значки 3, 4) получены при следующих сечениях захвата: $\sigma_{n1}^0 = 1.2 \cdot 10^{-15}$ см², $\sigma_{n2}^0 = 5.2 \cdot 10^{-17}$ см², $\sigma_{p03}^0 = 7 \cdot 10^{-16}$ см², $\sigma_{n04}^+ = 1.6 \cdot 10^{-12}$ см² [31], $\sigma_{p05}^0 = 1.4 \cdot 10^{-14}$ см² [29] и значениях полных концентраций исходных ловушек, указанных в таблице.

В рамках модели зависимости $\Delta V_g(Q_{inj})$ с тенденцией к насыщению объясняются заполнением электронами расположенных вблизи затвора нейтральных электронных ловушек по реакциям (1), (2) с большим ($\sigma_{n1}^0 = 1.2 \cdot 10^{-15}$ см²) и малым ($\sigma_{n2}^0 = 5.2 \cdot 10^{-17}$ см²)

Полные концентрации ловушек в p - и n -канальных транзисторах

Образец	Q_{R0}^0 , см ⁻²	Q_{S0}^0 , см ⁻²	Q_{TH0}^0 , см ⁻²	Q_{T0}^0 , см ⁻²
p -МОПТ	$2.1 \cdot 10^{12}$	$5.3 \cdot 10^{12}$	$2.5 \cdot 10^{12}$	–
n -МОПТ	$3.6 \cdot 10^{12}$	$4.7 \cdot 10^{12}$	$1.2 \cdot 10^{12}$	$3.0 \cdot 10^{11}$

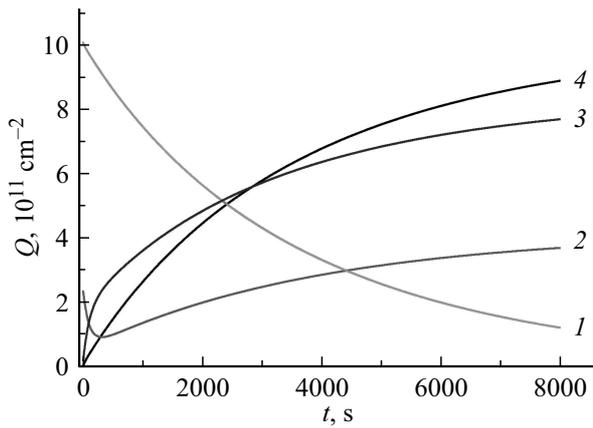


Рис. 2. Зависимости от времени инжекции Q_{TNO}^0 (1), Q_{T0}^0 (2), Q_{0r} (3) и $|Q_{it}|$ (4) для *n*-МОПТ.

сечениями захвата соответственно. Концентрация, соответствующая насыщению, устанавливается при равенстве скоростей реакций захвата электронов на нейтральные ловушки (1), (2) и реакций их нейтрализации дырками (7), (8). Ширина распределения ловушек значительно меньше толщины подзатворного диэлектрика, так что они оказывают слабое влияние на соответствующие зависимости $\Delta V_t(Q_{inj})$.

Электронные ловушки в SiO₂ связывают обычно с присутствием фрагментов воды и групп OH [1,3,4]. Распределение таких ловушек по толщине оксида, как правило, однородное [1,3]. В нашем случае ловушки локализованы вблизи затвора. Причиной появления электронных ловушек вблизи *n*⁺-поликристаллического затвора может являться тонкий слой SiO₂, обогащенный фосфором при диффузионном легировании поликристаллического затвора фосфором. Электронные ловушки, связанные с наличием фосфорно-силикатного стекла (ФСС) поверх термического диоксида кремния, наблюдались ранее в структурах Al–ФСС–SiO₂–Si [12,32,33] и связывались с нарушениями структуры SiO₂ атомами фосфора. Отметим, что в работе [12] также наблюдались два разных сечения захвата для электронных ловушек: $\sigma_{n1} = 1.4 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$ и $\sigma_{n2} = 3.2 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$, а в работе [33] было получено $\sigma_n = (3.5\text{--}4.3) \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$.

Дырочные безводородные ловушки связываются с E'-центрами ($O_3 \equiv Si\bullet$) в SiO₂, а водородосодержащие с центрами типа $O_3 \equiv Si-H$ [13]. Захват дырок на водородосодержащие центры по реакции (3) приводит к образованию положительного объемного заряда на безводородных ловушках вблизи подложки и нейтрального водорода, который, диффундируя к МФГ SiO₂–Si, приводит к образованию ПС на границе Si–SiO₂ по реакции (4). В модели учитывалось, что при отрицательном напряжении на затворе в образовании ПС на МФГ SiO₂–Si могут участвовать только нейтральные атомы водорода.

Представляется интересным смена знака порогового напряжения *n*-канальных МОП-транзисторов (4, 4' на

рис. 1), обусловленного появлением сначала положительного, а затем отрицательного зарядов вблизи МФГ Si–SiO₂. Появление положительного объемного заряда вблизи анода при туннельной инжекции электронов наблюдалось неоднократно и связывалось с ударной ионизацией зона-зона или(и) ловушка-зона [6–12]. В рамках настоящей модели образование нескомпенсированного положительного заряда описано посредством захвата дырок по реакции (6) на безводородные дырочные ловушки, присутствующие исходно в подзатворном оксиде кремния наряду с водородосодержащими ловушками. На рис. 2 показаны временные зависимости полных концентраций исходных водородосодержащих ловушек (кривая 1), нейтральных безводородных ловушек (кривая 2), положительно заряженных безводородных ловушек (кривая 3), а также отрицательно заряженных ПС (кривая 4). Как видно из рисунка, при малых временах инжекции преобладает положительный заряд безводородных ловушек. При больших временах инжекции электроны частично нейтрализуют положительно заряженные безводородные ловушки по реакции (5), так что начинает преобладать отрицательный заряд ПС. Полная концентрация исходных водородосодержащих ловушек при этом падает, а нейтральных безводородных после начального падения растет вместе с концентрацией положительно заряженных безводородных ловушек.

5. Заключение

Разработана количественная модель накопления зарядов в подзатворном диэлектрике при туннельной инжекции электронов. В модели учитывается захват электронов и дырок на безводородные и водородосодержащие ловушки, а также генерация поверхностных состояний при взаимодействии дырок с водородосодержащими центрами. С помощью модели проанализированы экспериментальные зависимости сдвигов напряжения затвора и порогового напряжения *n*- и *p*-канальных МОП-транзисторов от заряда инжекции в режиме постоянного тока.

Зависимости сдвига напряжения затвора *p*- и на *n*-канальных МОП-транзисторах от времени инжекции моделируются посредством захвата электронов на расположенные вблизи *n*⁺-поликристаллического затвора нейтральные электронные ловушки с большим ($\sigma_{n1}^0 = 1.2 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$) и малым ($\sigma_{n2}^0 = 5.2 \cdot 10^{-17} \text{ см}^2$) сечениями захвата.

Зависимости сдвига порогового напряжения *p*- и *n*-канальных МОП транзисторов моделируются посредством захвата дырок водородосодержащими ловушками. В результате их развала образуется положительный объемный заряд на безводородных центрах, расположенных вблизи подложки, и поверхностные состояния на МФГ Si–SiO₂, заряженные положительно в *p*-канальных и отрицательно в *n*-канальных МОП-транзисторах.

Авторы выражают благодарность В.В. Андрееву за полезные замечания.

Список литературы

- [1] А.П. Барабан, В.В. Булавинов, П.П. Коноров. *Электроника слоев SiO₂ на кремнии* (Л., ЛГУ, 1988).
- [2] О.В. Александров. *ФТП*, **51** (8), 1105 (2017).
- [3] F.J. Feigl, D.R. Young, D.J. DiMaria, S. Lai, J. Calise. *J. Appl. Phys.*, **52**, 5665 (1981).
- [4] А.М. Емельянов. *ФТП*, **52**, 1060 (2010).
- [5] Y. Nissan-Cohen, J. Shappir, D. Frohman-Bentchkowsky. *J. Appl. Phys.*, **54**, 5793 (1983).
- [6] N. Klein, P. Solomon. *J. Appl. Phys.*, **47**, 4364 (1976).
- [7] Y. Nissan-Cohen, J. Shappir, D. Frohman-Bentchkowsky. *J. Appl. Phys.*, **58**, 2252 (1985).
- [8] C.-F. Chen, C.-Y. Wu. *J. Appl. Phys.*, **60**, 3926 (1986).
- [9] P. Fazan, M. Dutoit, C. Martin, M. Ilegems. *Sol. St. Electron.*, **30**, 829 (1987).
- [10] P. Samanta, C.K. Sarkar. *J. Appl. Phys.*, **83**, 2662 (1998).
- [11] M. Knoll, D. Bräunig, W.R. Fahrner. *J. Appl. Phys.*, **53**, 6946 (1982).
- [12] В.В. Андреев, В.Г. Барышев, Г.Г. Бондаренко, А.А. Столяров, В.А. Шахнов. *Микроэлектроника*, **26** (6), 440 (1997).
- [13] V.V. Afanas'ev, G.J. Adriaenssens, A. Stesmans. *Microelectron. Eng.*, **59**, 85 (2001).
- [14] M.V. Fischetti. *Phys. Rev. B*, **31**, 2099 (1985).
- [15] D. J. DiMaria, E. Cartier, D.A. Buchanan. *J. Appl. Phys.*, **80**, 304 (1996).
- [16] S.K. Lai. *Appl. Phys. Lett.*, **39**, 58 (1981).
- [17] D. J. DiMaria, E. Cartier, D. Arnold. *J. Appl. Phys.*, **73**, 3367 (1993).
- [18] Q.D.M. Khosru, N. Yasuda, K. Taniguchi, C. Hamaguchi. *J. Appl. Phys.*, **77**, 4494 (1995).
- [19] Г.В. Гадияк. *ФТП*, **31**, 257 (1997).
- [20] A.V. Schwerin, M. M. Heyns, W. Weber. *J. Appl. Phys.*, **67**, 7595 (1990).
- [21] D.A. Buchanan, D.J. DiMaria. *J. Appl. Phys.*, **67**, 7439 (1990).
- [22] M. Lenzlinger, E.H. Snow. *J. Appl. Phys.*, **40**, 278 (1969).
- [23] P. Samanta, C.K. Sarkar. *Sol. St. Electron.*, **46**, 279 (2002).
- [24] О.В. Александров. *ФТП*, **48**, 523 (2014). *ФТП*, **49**, 793 (2015).
- [25] E. Cartier, J.H. Stathis, D.A. Buchanan. *Appl. Phys. Lett.*, **63**, 1510 (1993).
- [26] X. Gao, S.S. Yee. *IEEE Trans. Electron. Dev.*, **41**, 1819 (1994).
- [27] Q.D.M. Khosru, N. Yasuda, K. Taniguchi, C. Hamaguchi. *J. Appl. Phys.*, **76**, 4738 (1994).
- [28] L. Do Thanh, M. Aslam, P. Balk. *Sol. St. Electron.*, **29**, 829 (1986).
- [29] R.J. Krantz, L.W. Aukerman, T.C. Zietlow. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **NS-34** (6), 1196 (1987).
- [30] J.J. Tzou, J.Y.-C. Sun, C.-T. Sah. *Appl. Phys. Lett.*, **43**, 861 (1983).
- [31] H.E. Boesch, F.B. McLean, J.M. Benedetto, J.M. Mc Garrity. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **NS-33** (6), 1191 (1986).
- [32] I.P. Mikhailovskii, P.B. Potapov, A.E. Epov. *Phys. Status Solidi A*, **94**, 679 (1986).
- [33] В.С. Солдатов, Н.В. Соболев, И.Б. Варлашов, В.А. Коляда, А.Г. Воеводин. *Изв. вузов. Физика*, № 12, 82 (1989).

Редактор Г.А. Оганесян

Model of charges accumulation in *n*- and *p*-MOS-transistors at the tunnel injections of electrons from a gate

O.V. Aleksandrov, S.A. Mokrushina

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

Abstract The quantitative model of charges accumulation in gate dielectric at tunnel injection of electrons from a gate on Fowler–Nordheim mechanism is developed. In model capture of electrons and holes on hydrogen-free and hydrogen-related traps, and also generation of surface states at interaction of holes with the hydrogen-related centers is considered. On the basis of model experimental dependences of threshold voltage shifts and gate voltage shifts of *n*- and *p*-channel MOS-transistors from the injected charge in the constant current mode are analysed.