

# Модель термополевой нестабильности *p*-МОП-транзисторов при отрицательном смещении затвора

© О.В. Александров

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

E-mail: Aleksandr\_ov@mail.ru

Поступила в Редакцию 21 марта 2019 г.

В окончательной редакции 4 сентября 2019 г.

Принята к публикации 16 сентября 2019 г.

Разработана новая количественная модель термополевой нестабильности *p*-МОП-транзисторов при отрицательном смещении затвора. В основе модели лежит реакция депассивации поверхностных состояний на межфазной границе Si–SiO<sub>2</sub> и водородосодержащих дырочных ловушек вблизи межфазной границы Si–SiO<sub>2</sub> положительно заряженными ионами водорода H<sup>+</sup>, накапливающимися в *p*<sup>+</sup>-инверсном слое кремниевой подложки. Зависимости поверхностного и объемного зарядов в *p*-МОП-транзисторах от времени отрицательной термополевой нестабильности определяются кинетикой диффузии и дрейфа ионов H<sup>+</sup> из кремниевой подложки к межфазной границе Si–SiO<sub>2</sub>. Влияние напряжения затвора на отрицательную термополевую нестабильность объясняется посредством влияния напряженности электрического поля на коэффициент сегрегации ионов H<sup>+</sup> на межфазной границе Si–SiO<sub>2</sub>. Релаксация положительного объемного заряда, введенного в подзатворный диэлектрик при отрицательной термополевой нестабильности, описывается туннельной разрядкой оксидных ловушек электронами кремниевой подложки.

**Ключевые слова:** МОП-транзистор, термополевая нестабильность, поверхностные состояния, оксидные ловушки, моделирование.

DOI: 10.21883/FTP.2020.02.48901.9111

## 1. Введение

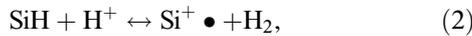
При отрицательном смещении затвора и повышенных температурах в кремниевых *p*-канальных МОП-транзисторах наблюдается сдвиг порогового напряжения и уменьшение подвижности носителей в канале вследствие накопления положительного заряда на поверхностных состояниях (ПС) и в подзатворном диэлектрике. Явление получило название отрицательной термополевой нестабильности (ОТПН) (negative bias temperature instability (NBTI)). ОТПН во многом определяет срок службы современных КМОП ИМС и поэтому ее исследованию уделяется повышенное внимание (см. обзоры [1–5]). ОТПН наблюдается уже при относительно невысоких электрических полях в подзатворном диэлектрике ( $E = 2–6$  МВ/см), когда нет ударной ионизации в объеме диэлектрика или в кремниевой подложке и практически отсутствует туннельная инжекция носителей из затвора. Установлено, что ОТПН является функцией времени, напряженности электрического поля и температуры. Зависимость сдвига порогового напряжения от времени описывается степенной зависимостью  $\Delta V_t \sim t^n$ , где показатель  $n$  изменяется от  $n = 0.5–1$  при малых временах ( $t = 10^{-3}–10^{-2}$  с) до  $n = 0.1–0.16$  при больших временах ( $t = 10^5–10^6$  с). Зависимость от напряженности электрического поля — степенная с показателем  $m = 1.5–3$  или экспоненциальная. Температурная зависимость в диапазоне 100–250°С характеризуется энергией активации 0.1–0.3 эВ.

Для объяснения физического механизма ОТПН была предложена реакционно-диффузионная (Р-Д) модель [6,7], в основе которой лежит реакция диссоциации SiH-связи на межфазной границе (МФГ) Si–SiO<sub>2</sub> под действием электрического поля:



где Si• означает оборванную связь атома кремния на МФГ Si–SiO<sub>2</sub> ( $P_b$ -центр или поверхностное состояние). На базе Р-Д модели [6,7] был разработан ряд модифицированных моделей [1–5,8,9], описывающих основные закономерности и особенности ОТПН. Учитывалось влияние дырок в реакции (1), образование водорода в различных формах — атомной (H), молекулярной (H<sub>2</sub>) и ионизированной (H<sup>+</sup>), их диффузия в SiO<sub>2</sub>. Однако значения отдельных параметров в количественных Р-Д моделях [8,9], в частности коэффициенты диффузии водорода в SiO<sub>2</sub>, значительно (на 5–7 порядков) ниже установленных экспериментальных значений [10,11]. Зависимость ОТПН от напряжения на затворе в Р-Д моделях [1–9] объяснялась влиянием электрического поля на вероятность туннелирования дырок из кремниевой подложки в диоксид кремния SiO<sub>2</sub>. Отметим однако, что преодоление высокого потенциального барьера на МФГ Si–SiO<sub>2</sub> (~ 4.6 эВ) возможно только горячими дырками, которые практически отсутствуют при низких ( $E < 6$  МВ/см) напряженностях электрического поля в SiO<sub>2</sub>. Полная физическая картина ОТПН продолжает оставаться дискуссионной [12].

Депассивация водородных связей на МФГ Si–SiO<sub>2</sub> при ОТПН (так же как и при ионизирующем облучении [13]) может осуществляться по энергетически более выгодной реакции — положительными ионами водорода (протонами) с энергией активации 0.95 эВ вместо 2.1 эВ в реакции (1) [14]:

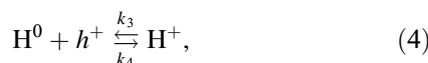
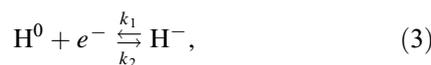


где SiH — водородосодержащая ловушка на МФГ Si–SiO<sub>2</sub>. При этом источником свободного водорода может являться не МФГ Si–SiO<sub>2</sub>, как это полагается в Р-Д моделях [1–9], а кремниевая подложка, в которой водород находится как в свободном состоянии, так и связанным в комплексы с легирующими примесями.

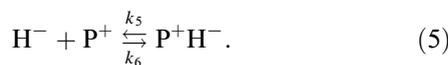
В настоящей работе предложена новая количественная модель ОТПН на основе реакции депассивации водородных связей типа (2) положительными ионами водорода, поступающими из объема кремниевой подложки.

## 2. Описание модели

После операций термического окисления, формирования подзатворного диэлектрика, затвора и металлизации структура МОП-транзистора оказывается насыщенной водородом как в свободном, так и в связанном состояниях. Концентрация водорода определяется технологической предысторией МОП-структуры и может достигать 10<sup>20</sup> см<sup>-3</sup> [10]. При температуре ОТПН в кремниевой подложке МОП-транзисторов водород становится подвижным и устанавливается равновесие между водородосодержащими компонентами — нейтральными, отрицательно и положительно заряженными атомами водорода (H<sup>0</sup>, H<sup>-</sup> и H<sup>+</sup>):

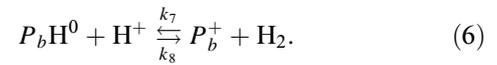


а также комплексами водорода с легирующими примесями, в частности с донорной примесью фосфора в *n*-кремниевой подложке *p*-МОП-транзисторов:

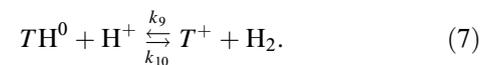


При приложении отрицательного напряжения к затвору *p*-МОП-транзистора выше порогового в приповерхностной области *n*-кремниевой подложки образуется инверсный *p*<sup>+</sup>-слой, в котором в соответствии с реакцией (4) происходит накопление положительно заряженных ионов водорода. Эти ионы водорода могут переходить из кремния в SiO<sub>2</sub> и обратно через МФГ Si–SiO<sub>2</sub>, преодолевая относительно невысокий энергетический барьер [15]. Коэффициент сегрегации ионов H<sup>+</sup> на МФГ Si–SiO<sub>2</sub> должен зависеть от напряженности и полярности электрического поля посредством

их влияния на эффективную высоту барьера. После проникновения в SiO<sub>2</sub> ионы водорода H<sup>+</sup> взаимодействуют с пассивированными P<sub>b</sub>H-центрами и депассивируют их с образованием поверхностных состояний (P<sub>b</sub>) и молекулярного водорода по реакции [14,16]



В реакции (6) учтено, что поверхностные состояния на МФГ *p*<sup>+</sup>-инверсного слоя Si с SiO<sub>2</sub> заряжаются положительно. Ионы H<sup>+</sup> взаимодействуют также с водородосодержащими ловушками TH<sup>0</sup>, расположенными в SiO<sub>2</sub> вблизи МФГ Si–SiO<sub>2</sub>, по реакции, аналогичной (6), образуя положительный объемный заряд в диэлектрике:



Ловушками являются, по-видимому, кислородные вакансии (E'-центры), располагающиеся в тонком слое термического SiO<sub>2</sub> толщиной ~ 1–10 нм, прилегающем к МФГ Si–SiO<sub>2</sub> [13,17]. Молекулярный водород, образующийся в реакциях (6) и (7), диффундирует через SiO<sub>2</sub> к затвору (обычно сильно легированный поликремний), в котором накапливается, растворяясь или захватываясь на межзеренные границы. При снятии напряжения с затвора накопленный водород может диффундировать обратно из затвора в подзатворный диэлектрик, пассивируя дырочные ловушки вблизи МФГ Si–SiO<sub>2</sub> и поверхностные состояния на МФГ Si–SiO<sub>2</sub> по обратным реакциям (6) и (7). Другим механизмом релаксации при снятии или изменении напряжения на затворе является туннельная разрядка объемного заряда диэлектрика электронами подложки [18].

Процесс перераспределения и накопления зарядов в МОП структуре в соответствии с реакциями (3)–(7) описываем следующими диффузионно-кинетическими уравнениями непрерывности и уравнением Пуассона:

а) в Si (при 0 ≤ *x* ≤ *d*<sub>Si</sub>)

$$\frac{\partial n}{\partial t} = D_n \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} + \mu_n \frac{\partial}{\partial x} (nE) - k_1 C_H^0 n + k_2 C_H^-, \quad (8)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = D_p \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} - \mu_p \frac{\partial}{\partial x} (pE) - k_3 C_H^0 p + k_4 C_H^+, \quad (9)$$

$$\frac{\partial C_H^0}{\partial t} = D_H^0 \frac{\partial^2 C_H^0}{\partial x^2} - k_1 C_H^0 n - k_3 C_H^0 p + k_2 C_H^- + k_4 C_H^+, \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_H^-}{\partial t} = & D_H^- \frac{\partial^2 C_H^-}{\partial x^2} + \mu_H^- \frac{\partial}{\partial x} (C_H^- E) \\ & + k_1 C_H^0 n - k_2 C_H^- - k_5 C_H^- C_P^+ + k_6 C_{PH}^0, \end{aligned} \quad (11)$$

$$\frac{\partial C_H^+}{\partial t} = D_H^+ \frac{\partial^2 C_H^+}{\partial x^2} - \mu_H^+ \frac{\partial}{\partial x} (C_H^+ E) + k_3 C_H^0 p - k_4 C_H^+, \quad (12)$$

$$\frac{\partial C_{PH}^0}{\partial t} = k_5 C_H^- C_P^+ - k_6 C_{PH}^0; \quad (13)$$

б) на МФГ Si–SiO<sub>2</sub> (при  $x = d_{Si}$ )

$$\frac{\partial N_{it}}{\partial t} = k_7(N_{i0} - N_{it})C_H^+ - k_8N_{it}C_{H2}; \quad (14)$$

в) в объеме SiO<sub>2</sub> (при  $d_{Si} \leq x \leq d$ )

$$\frac{\partial C_H^+}{\partial t} = D_H^* \frac{\partial^2 C_H^+}{\partial x^2} - \mu_H^* \frac{\partial}{\partial x} (C_H^+ E) - k_9 C_{TH}^0 C_H^+ + k_{10} C_T^+ C_{H2}, \quad (15)$$

$$\frac{\partial C_P^+}{\partial t} = k_9 C_{TH}^0 C_H^+ - k_{10} C_T^+ C_{H2} - RC_T^+, \quad (16)$$

$$\frac{\partial C_{H2}}{\partial t} = D_{H2} \frac{\partial^2 C_{H2}}{\partial x^2}; \quad (17)$$

г) в затворе (при  $d \leq x \leq d_G$ )

$$\frac{\partial C_{H2}}{\partial t} = D_{H2}^* \frac{\partial^2 C_{H2}}{\partial x^2}; \quad (18)$$

д) во всей МОП-структуре под затвором (при  $0 \leq x \leq d$ )

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = -\frac{\rho}{\varepsilon \varepsilon_0}, \quad (19)$$

где  $x$  — координата, отсчитываемая от нижней границы кремниевой подложки при  $x = 0$  до границы с подзатворным диэлектриком при  $x = d_{Si}$ , далее до границы с затвором при  $x = d$  ( $d = d_{Si} + d_{ox}$ , где  $d_{ox}$  — толщина подзатворного диэлектрика) и до верхней границы затвора при  $x = d_G$ ;  $t$  — время;  $n$  и  $p$  — концентрации свободных электронов и дырок в Si соответственно;  $D_n$ ,  $D_p$ ,  $\mu_n$  и  $\mu_p$  — коэффициенты диффузии и подвижности электронов и дырок в Si;  $C_H^0$ ,  $C_H^-$  и  $C_H^+$  — концентрации нейтральных атомов, отрицательно и положительно заряженных ионов водорода соответственно;  $D_H^0$ ,  $D_H^-$ ,  $D_H^+$ ,  $\mu_H^-$  и  $\mu_H^+$  — их коэффициенты диффузии и подвижности;  $N_D$  — концентрация доноров (фосфора) в кремниевой подложке;  $C_P^+$  и  $C_{PH}^0$  — концентрации ионизованных атомов фосфора и их комплексов с водородом в Si ( $C_P^+ = N_D - C_{PH}^0$ );  $N_{i0}$  и  $N_{it}$  — начальные плотности пассивированных  $P_b$ -центров и текущие плотности депассивированных  $P_b$ -центров;  $C_{TH}^0$  и  $C_T^+$  — концентрации нейтральных водородосодержащих и положительно заряженных безводородных ловушек;  $D_H^*$  и  $\mu_H^*$  — коэффициент диффузии и подвижность ионов H<sup>+</sup> в SiO<sub>2</sub>;  $D_{H2}$  и  $D_{H2}^*$  — коэффициенты диффузии H<sub>2</sub> в SiO<sub>2</sub> и в затворе соответственно;  $V$  — распределение электрического потенциала;  $E$  — напряженность электрического поля,  $E = -dV/dx$ ;  $\rho$  — плотность объемного заряда,  $\rho = q(p - n + C_P^+ + C_H^+ - C_H^- + C_T^+)$ ,  $q$  — заряд электрона;  $\varepsilon$  — относительная диэлектрическая проницаемость Si ( $\varepsilon(\text{Si}) = 11.8$ ) или SiO<sub>2</sub> ( $\varepsilon(\text{SiO}_2) = 3.9$ );  $\varepsilon_0$  — диэлектрическая постоянная;  $R$  — вероятность туннельной разрядки положительно заряженных ловушек  $T^+$ , зависящая от распределения ловушек в оксиде

и напряженности электрического поля [18,19]:

$$R = \alpha \exp[-\beta(E)(x - d_{Si})], \quad (20)$$

где  $\alpha$  — частотный фактор,  $\beta$  — барьерный фактор,  $\beta(E) = \beta_0(1 - \gamma E)^{0.5}$ ,  $\beta_0$  — барьерный фактор при  $E = 0$ ,  $\gamma = qx_0/E_T$ ,  $E_T$  — высота барьера,  $x_0$  — ширина барьера.

Уравнения (8)–(19) решались при следующих начальных и граничных условиях. Начальные концентрации нейтральных, отрицательно и положительно заряженных атомов водорода, а также комплексов водорода с легирующей примесью полагались однородными по глубине кремния (при  $0 \leq x \leq d_{Si}$ ):

$$\begin{aligned} C_H^0(x, 0) &= C_{H0}^0, & C_H^-(x, 0) &= C_{H0}^-, \\ C_H^+(x, 0) &= C_{H0}^+, & C_{PH}^0(x, 0) &= C_{PH0}^0 \end{aligned} \quad (21)$$

и находящимися в равновесии друг с другом:

$$\begin{aligned} C_{H0}^- &= C_{H0}^0 n k_1 / k_2, & C_{H0}^+ &= C_{H0}^0 p k_3 / k_4, \\ C_{PH0}^0 &= C_{H0}^- C_P^+ k_5 / k_6. \end{aligned} \quad (22)$$

Начальная плотность пассивированных  $P_b$ -центров на МФГ Si–SiO<sub>2</sub>

$$N_i(0) = N_{i0}. \quad (23)$$

Начальную концентрацию водородосодержащих ловушек полагаем неоднородной по глубине SiO<sub>2</sub>

$$C_{TH}^0(x) = Q_{TH0}^0 \exp[-(x - d_{Si})/l_T]/l_T, \quad (24)$$

где  $Q_{TH0}^0$  — начальная плотность водородосодержащих ловушек,  $l_T$  — ширина распределения. Нижняя граница кремниевой подложки полагается отражающей для всех подвижных компонентов (H<sup>0</sup>, H<sup>-</sup> и H<sup>+</sup>) при  $x = 0$ :

$$j_H^0 = j_H^- = j_H^+ = 0, \quad (25)$$

где

$$j_H^0 = -D_H^0 \frac{\partial C_H^0}{\partial x}, \quad j_H^- = -D_H^- \frac{\partial C_H^-}{\partial x} - \mu_H^- C_H^- E,$$

$$j_H^+ = -D_H^+ \frac{\partial C_H^+}{\partial x} + \mu_H^+ C_H^+ E.$$

На МФГ Si–SiO<sub>2</sub> при  $x = d_{Si}$  ионы H<sup>+</sup> перераспределяются в соответствии с условием непрерывности потока и коэффициентом сегрегации  $m_{s1}$ :

$$m_{s1} = C_H^+(\text{SiO}_2)/C_H^+(\text{Si}). \quad (26)$$

Полагаем, что электрическое поле влияет на эффективную высоту барьера для ионов H<sup>+</sup> на МФГ Si–SiO<sub>2</sub>, приводя к зависимости коэффициента сегрегации  $m_{s1}$  от напряженности электрического поля вида

$$m_{s1}(E) = m_{s10} \exp(aE/kT), \quad (27)$$

где  $m_{s10}$  — коэффициент сегрегации при  $E = 0$ ,  $a$  — эффективная ширина барьера,  $k$  — постоянная Больцмана,

$T$  — температура. Полагается, что МФГ Si–SiO<sub>2</sub> при  $x = d_{Si}$  является отражающей для молекул H<sub>2</sub>:

$$j_{H_2} = -D_{H_2} \frac{\partial C_{H_2}}{\partial x} = 0, \quad (28)$$

а МФГ SiO<sub>2</sub>-затвор при  $x = d$  — отражающей для ионов H<sup>+</sup>:

$$j_H^+ = -D_H^+ \frac{\partial C_H^+}{\partial x} + \mu_H^+ C_H^+ E = 0. \quad (29)$$

Затвор полагается стоком и накопителем для молекулярного водорода с коэффициентом сегрегации  $m_{s,2}$  на МФГ с затвором (при  $x = d$ ):

$$m_{s,2} = C_{H_2}(Gate)/C_{H_2}(SiO_2). \quad (30)$$

При ОТПН на затвор подается отрицательное напряжение  $V_{G1}$ , а при релаксации — напряжение  $V_{G2}$

$$V(d, t) = V_{G1} \text{ или } V_{G2}. \quad (31)$$

Сдвиг порогового напряжения МОП-структуры при ОТПН  $\Delta V_t$  складывается из поверхностной  $\Delta V_{it}$  и объемной  $\Delta V_{ot}$  составляющих:

$$\Delta V_t = \Delta V_{it} + \Delta V_{ot} = -(Q_{it} + Q_{ot})/C_{ox}, \quad (32)$$

где  $C_{ox}$  — удельная емкость диэлектрика,  $C_{ox} = \epsilon\epsilon_0/d$ ,  $Q_{ot}$  — изменение объемного заряда в оксиде при ОТПН,

$$Q_{ot} = q \int_{d_{Si}}^d C_T^+ (1 - (x - d_{ox})/d_{ox}) dx, \quad (33)$$

$Q_{it}$  — изменение заряда ПС при ОТПН. Заряд ПС в общем случае зависит от поверхностного потенциала, уровня и типа легирования кремниевой подложки, а также от распределения ПС по энергиям. Полагаем, что при отрицательном напряжении на затворе выше порогового и образовании инверсного  $p^+$ -слоя все образующиеся ПС заряжены положительно, т. е.

$$Q_{it} = qN_{it}. \quad (34)$$

Параметрами модели являются константы скоростей реакций (3)–(7) и коэффициенты сегрегации на обеих МФГ. При диффузионном контроле константы скоростей реакций:  $k_1 = 4\pi R_1 D_n$ ,  $k_3 = 4\pi R_3 D_p$ ,  $k_5 = 4\pi R_5 D_H^-$ ,  $k_{8,10} = 4\pi R_{8,10} D_{H_2}$ ,  $k_{7,9} = 4\pi R_{7,9} D_H^+$ , где  $R$  — радиусы захвата, полагаем  $R_{1,3,5,7,9} = 1 \text{ \AA}$ ,  $R_{8,10} = 10 \text{ \AA}$ . Константы скоростей обратных реакций в Si находим из условия равновесия соответствующих реакций:

$$k_2 = k_1 n_H, \quad n_H = N_C \exp\left(\frac{E_C - E_H^-}{kT}\right);$$

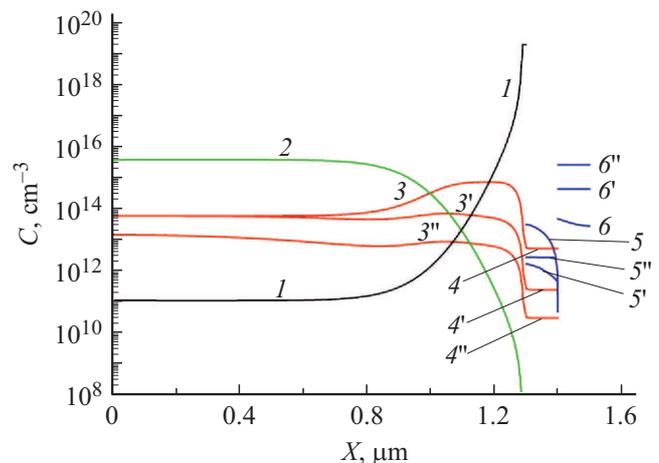
$$k_4 = k_3 p_H, \quad p_H = N_v \exp\left(\frac{E_H^+ - E_v}{kT}\right);$$

$$k_6 = \nu_{PH} \exp\left(\frac{E_{PH}^0}{kT}\right).$$

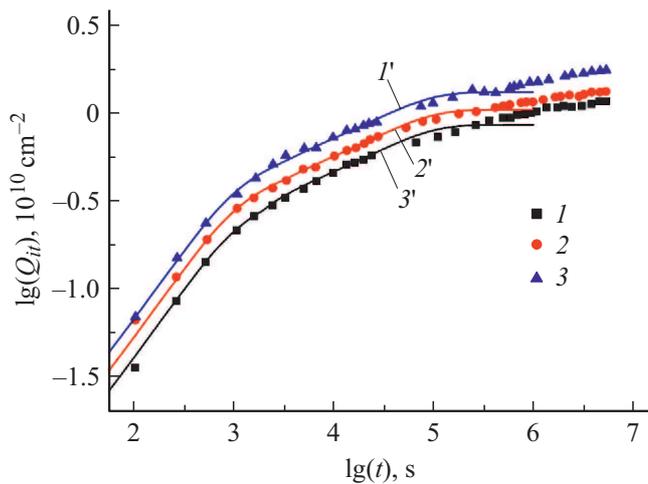
Значения известных параметров брались из экспериментальных работ. В Si:  $D_H^0 = 8.4 \exp(-\frac{1.12}{kT})$ ,  $D_H^- = 1.3 \cdot 10^{-2} \exp(-\frac{0.8}{kT})$ ,  $E_H^- = E_c - 0.06 \text{ эВ}$ ,  $E_H^+ = E_v + 0.6 \text{ эВ}$ ,  $\nu_{PH} = 10^{13} \text{ с}^{-1}$ ,  $E_{PH}^0 = 1.21 \text{ эВ}$  [20,21]; на МФГ:  $N_{i0} = 1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$  [22]; в SiO<sub>2</sub>:  $D_H^* = 1.0 \exp(-\frac{0.76}{kT})$  [23],  $D_{H_2} = 7.2 \cdot 10^{-5} \exp(-\frac{0.58}{kT})$  [24]. Полагали на МФГ SiO<sub>2</sub>-затвор  $m_{s,2} = 100$ , а в затворе  $D_{H_2}^* = D_{H_2}$ . Влияние напряженности электрического поля осуществляется через коэффициент сегрегации ионов H<sup>+</sup> на МФГ Si–SiO<sub>2</sub> —  $m_{s,1}(E)$ , даваемым выражением (26), в котором параметры  $m_{s,10}$  и  $\alpha$  определялись из соответствия расчетов экспериментальным данным.

### 3. Расчеты по модели

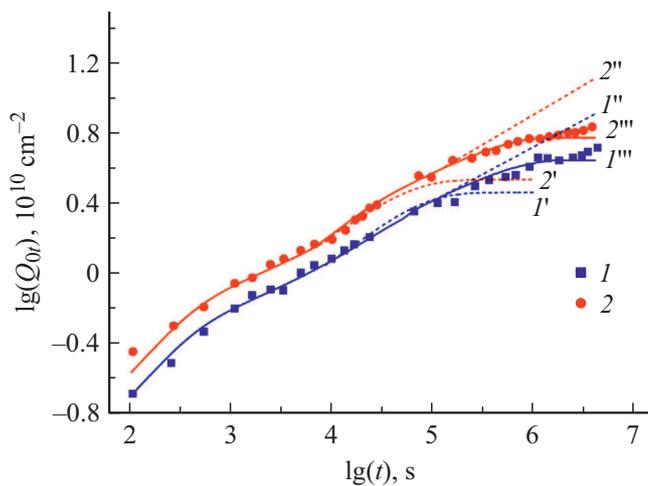
Система уравнений модели (7)–(19) с начальными условиями (21)–(24), граничными условиями (25)–(31) с учетом (20), (32)–(34) решалась численно с использованием неявной разностной схемы. На рис. 1 показаны распределения дырок (1), электронов (2), ионов водорода H<sup>+</sup> в кремнии (3–3'') и в SiO<sub>2</sub> (4–4''), а также молекулярного водорода H<sub>2</sub> в SiO<sub>2</sub> (5–5'') и в затворе (6–6'') по глубине МОП-структуры после воздействия ОТПН при  $V_G = -40 \text{ В}$  в течение 10, 10<sup>3</sup> и 10<sup>5</sup> с. При подаче напряжения на затвор больше порогового на поверхности кремния образуется инверсный  $p^+$ -слой, в котором, согласно реакции (4), увеличивается концентрация положительно заряженных ионов водорода H<sup>+</sup>. В соответствии с коэффициентом сегрегации, зависящим от электрического поля, часть ионов H<sup>+</sup> переходит в SiO<sub>2</sub>, где захватывается на МФГ Si–SiO<sub>2</sub> и на водородосодержащие ловушки. В результате происходят реакции депассивации (6) и (7) и об-



**Рис. 1.** Расчетные распределения компонентов по глубине МОП-структуры: 1 —  $p$ ; 2 —  $n$ ; 3, 3', 3'' — H<sup>+</sup> в Si; 4, 4', 4'' — H<sup>+</sup> в SiO<sub>2</sub>; 5, 5', 5'' — H<sub>2</sub> в Si; 6, 6', 6'' — H<sub>2</sub> в затворе при временах ОТПН, с: 3–5 — 10, 3'–5' — 10<sup>3</sup>, 3''–5'' — 10<sup>5</sup>. ( $V_G = -40 \text{ В}$ ,  $T = 150^\circ \text{C}$ ,  $C_{H_0}^0 = 7 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ,  $N_{i0} = 3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ ,  $N_D = 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ,  $d_{Si} = 1.3 \text{ мкм}$ ).



**Рис. 2.** Зависимости  $\Delta Q_{it}$  от времени ОТПН при  $V_G$ , В: 1, 1' — 35; 2, 2' — 40; 3, 3' — 45; 1–3 — эксперимент [25], 1'–3' — расчет при значениях:  $C_{H0}^0 = 7 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ,  $N_{i0} = 3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ ,  $N_D = 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ,  $d_{Si} = 1.3 \text{ мкм}$ .



**Рис. 3.** Зависимости  $\Delta Q_{0r}$  от времени ОТПН при  $V_G$ , В: 1, 1', 1'', 1''' — 35; 2, 2', 2'', 2''' — 45; 1, 2 — эксперимент [25], 1', 1'', 1''', 2', 2'', 2''' — расчет при значениях  $d_{Si}$ , мкм: 1', 1'', 2', 2''' — 1.3; 1'', 2'' — 10; 1''', 2''' — при наличии слоя с бором ( $N_B = 8 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ ,  $d_B = 0.1 \text{ мкм}$ ). ( $C_{H0}^0 = 7 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ,  $N_{i0} = 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ ,  $N_D = 1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ).

разуется молекулярный водород, который диффундирует через объем  $\text{SiO}_2$  к затвору. Со временем концентрации всех водородосодержащих компонентов в кремниевой подложке убывают вследствие захвата ионов  $\text{H}^+$  ловушками в  $\text{SiO}_2$  и стока молекулярного водорода в затвор.

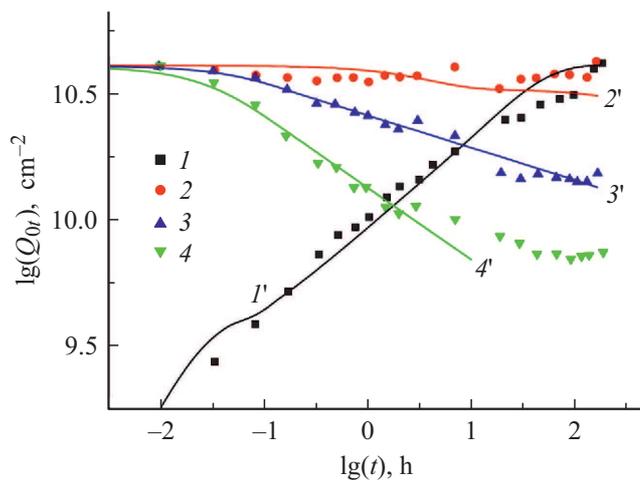
Расчеты по модели сравнивались с экспериментальными зависимостями  $Q_{it}(t)$  и  $Q_{0r}(t)$  из работы [25] (значки на рис. 2 и 3), полученными на мощных *p*-канальных VDMOSFET транзисторах типа IRF9520 с  $d_{ox} = 100 \text{ нм}$ , после воздействия напряжения на затворе  $V_G = -35, -40$  и  $-45 \text{ В}$  при температуре  $T = 150^\circ\text{C}$ .

Как видно из рис. 2, на зависимостях  $\log Q_{it}$  от  $\log t$  имеются три участка. Начальный участок при временах  $t = 10^2 - 10^3 \text{ с}$  имеет показатель степенной зависимости, изменяющийся от  $n \cong 1$  до  $n \cong 0.5$ . На среднем участке при временах  $10^3 < t < 10^5 \text{ с}$  показатель падает до  $n = 0.2 - 0.25$ . На конечном третьем участке при больших временах  $t > 10^5 \text{ с}$  показатель падает до  $n = 0.1 - 0.12$ . Удовлетворительное соответствие расчетных зависимостей  $Q_{it}(t)$  (кривые 1'–3') с экспериментальными получено на участках 1 и 2 при значениях параметров:  $C_{H0}^0 = 7 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ,  $d_{Si} = 1.3 \text{ мкм}$  и  $D_H^+ = 4.3 \cdot 10^{-13} \text{ см}^2/\text{с}$ . Отметим, что найденный коэффициент диффузии ионов водорода в кремнии  $D_H^+$  лежит в диапазоне литературных экспериментальных данных [20,26,27]. На участке 3 вместо продолжающегося роста расчет дает насыщение, обусловленное истощением водорода в кремниевой подложке.

Экспериментальные зависимости  $Q_{0r}(t)$  на рис. 3, (значки 1, 2) на среднем участке с  $n = 0.25 - 0.3$  подобны зависимостям  $Q_{it}(t)$  на рис. 2, (значки 1'–3'). Начальный участок 1 выражен слабее ( $n = 0.4 - 0.5$ ), а рост на участке 3 более сильный ( $n = 0.15 - 0.16$ ). Отличие в поведении заряда ПС  $Q_{it}(t)$  и объемного заряда  $Q_{0r}(t)$  может быть связано с латеральным разделением этих зарядов по площади затвора МОП-структуры. Начальный участок с  $n = 0.5 - 1$  сокращается при увеличении концентрации донорной примеси в подложке (кривые 1', 2'), что имеет место, например, при заходе затвора на противоионную  $n^+$ -область *p*-МОП-транзистора. При больших временах ОТПН так же, как и для  $Q_{it}(t)$  на рис. 2, имеем насыщение расчетной зависимости  $Q_{0r}(t)$  (кривые 1', 2'). Рост  $Q_{0r}(t)$  на участке 3 можно получить при увеличении толщины кремниевой подложки до 10 мкм (кривые 1'', 2''), или при введении в нижнюю часть кремниевой подложки слоя, легированного бором, с концентрацией  $N_B = 8 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$  при толщине  $d_B = 0.1 \text{ мкм}$  (кривые 1''', 2''') с параметрами образования комплексов ВН из работы [20] ( $\nu_{BH} = 3 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1}$ ,  $E_{BH}^0 = 1.28 \text{ эВ}$ ).

Влияние напряжения затвора осуществляется в модели посредством зависимости коэффициента сегрегации  $m_{s1}$  от напряженности электрического поля согласно выражению (27). На рис. 2, 3 показаны экспериментальные зависимости  $Q_{it}$  и  $Q_{0r}$  от времени ОТПН из работы [25] при напряжениях на затворе  $V_G = -35, -40$  и  $-45 \text{ В}$  (значки). Соответствие расчетов (кривые 1'–3' на рис. 2 и кривые 1''', 2''' на рис. 3) с экспериментальными зависимостями достигалось при следующих значениях параметров в выражении (27):  $m_{s10} = 0.04$ ,  $a = 2.9 \cdot 10^{-8} \text{ см}$ .

При снятии или изменении смещения затвора происходит уменьшение (релаксация) положительного объемного заряда, накопленного в  $\text{SiO}_2$  при ОТПН. Полагаем, что процесс релаксации происходит путем туннельной разрядки положительно заряженных оксидных



**Рис. 4.** Зависимости  $\Delta Q_{0r}$  от времени ОТПН при  $V_{G1} = -40$  В ( $1, 1'$ ) и времени релаксации ( $2, 2', 3, 3', 4, 4'$ ) при  $V_{G2}$ , В:  $2, 2' - -10$ ;  $3, 3' - 0$ ;  $4, 4' - +10$ .  $1-4$  — эксперимент [28],  $1'-4'$  — расчет при значениях:  $C_{H0}^0 = 6.5 \cdot 10^{13}$  см $^{-3}$ ,  $N_{i0} = 2.9 \cdot 10^{13}$  см $^{-2}$ ,  $N_D = 3 \cdot 10^{15}$  см $^{-3}$ ,  $d_{Si} = 1.9$  мкм.

ловушек электронами из кремниевой подложки. Скорость туннельной разрядки определяется в этом случае выражением (20). Расчеты по модели сравнивались с экспериментальными данными, полученными в работе [28], на  $p$ -канальных VDMOSFET транзисторах типа IRF9520 с  $d_{ox} = 100$  нм после воздействия напряжения на затворе  $V_{G1} = -40$  В с последующей выдержкой при напряжениях  $V_{G2} = -10, 0$  и  $+10$  В при температуре  $150^\circ\text{C}$ . Соответствие расчетов (кривые  $1'-4'$ ) экспериментальным данным (значки  $1-4$  на рис. 4) достигалось при следующих значениях параметров в выражении (20):  $\alpha = 1.5 \cdot 10^{-2}$  с $^{-1}$ ,  $\beta_0 = 7.9 \cdot 10^6$  см $^{-1}$ ,  $\gamma = 8 \cdot 10^{-7}$  см/В, что при  $x_0 \cong l_T$  соответствует высоте барьера  $E_T \cong 1, 2$  эВ.

#### 4. Обсуждение

В аналитических решениях Р-Д моделей [1–9] разные показатели связывались с разными состояниями водорода в  $\text{SiO}_2$ :  $n = 1/6$  — с  $\text{H}_2$ ,  $n = 1/4$  — с  $\text{H}_0$ ;  $n = 1/2$  — с  $\text{H}^+$ . В настоящей модели показатель  $n$  на начальном участке  $Q_{it}(t)$  определяется переходом от кинетики химической реакции первого порядка (6) с  $n = 1$  к кинетике диффузии и дрейфа с  $n = 0.5$  ионов  $\text{H}^+$  из  $p^+$ -инверсного слоя кремниевой подложки к МФГ Si–SiO $_2$  сначала без падения их концентрации на нижней границе кремниевой подложки (рис. 1, кривые  $3, 3'$ ). Падение показателя на среднем участке связано с обеднением источника водорода, выражающимся в падении концентрации  $\text{H}^+$  на нижней границе кремниевой подложки при  $x = 0$  (рис. 1, кривая  $3''$ ). Одновременно с  $\text{H}^+$  падают концентрации и остальных водородосодержащих компонентов, находящихся в равновесии с  $\text{H}^+$ , что замедляет падение скорости ро-

ста  $Q_{it}(t)$  и  $Q_{0r}(t)$  за счет подпитки из этих источников. Энергию активации на этом участке можно оценить как:  $E_a \cong nE_{DH}^+ \cong (0.12-0.18)$  эВ, где  $E_{DH}^+$  — энергия активации диффузии  $\text{H}^+$  в кремнии (0.6 эВ [20]), что примерно соответствует экспериментальным значениям 0.15–0.24 эВ в работе [25] и литературным данным 0.1–0.3 эВ [1–9]. На конечном участке при больших временах ОТПН ( $t > 10^5$  с) показатель степенной зависимости показывает дальнейшее падение, что в рамках модели объясняется постепенным истощением источников водорода в кремниевой подложке. При полном истощении водородосодержащих компонентов в кремниевой подложке водород перестает поступать в диэлектрик и показатель на расчетных кривых падает до  $n \cong 0$  (насыщение). Экспериментальные зависимости  $Q_{it}(t)$  и  $Q_{0r}(t)$  на рис. 2 и 3, имея тенденцию к насыщению при больших временах, полного насыщения не достигают. Причиной такого квазинасыщения может быть наличие (помимо рассматриваемого в настоящей одномерной модели планарного источника водорода в кремниевой подложке толщиной  $d_{Si}$ ) дополнительных источников водорода в кремниевой подложке. Такими источниками могут являться, в частности,  $p$ -области стока-истока  $p$ -МОП-транзистора, прилегающие к краям затвора. Действительно, наличие в кремниевой подложке области, легированной бором, с комплексами ВН приводит к дальнейшему росту  $Q_{0r}(t)$  и отодвигает начало насыщения заряда при больших временах ОТПН (кривые  $1'''$  и  $2'''$  на рис. 3). Отметим, что коэффициенты диффузии ионов водорода  $\text{H}^+$  и молекулярного водорода  $\text{H}_2$  в диоксиде кремния ( $D_H^* = 8.9 \cdot 10^{-10}$  см $^2$ /с,  $D_{H2} = 8.9 \cdot 10^{-12}$  см $^2$ /с при  $150^\circ\text{C}$ ) значительно превышают коэффициент диффузии ионов водорода  $\text{H}^+$  в кремнии ( $D_H^+ = 4.3 \cdot 10^{-13}$  см $^2$ /с при  $150^\circ\text{C}$ ). Поэтому в настоящей модели, в отличие от Р-Д моделей [1–9], лимитирующей является диффузия водорода в кремнии, а не в  $\text{SiO}_2$ .

Зависимость ОТПН от напряжения на затворе в Р-Д моделях [1–9] объяснялась влиянием электрического поля на вероятность туннелирования дырок из кремниевой подложки в диоксид кремния  $\text{SiO}_2$ . Отметим, что преодоление высокого потенциального барьера ( $\sim 4.6$  эВ) возможно только горячими дырками, которые практически отсутствуют при низких напряженностях электрического поля  $E < 6$  МВ/см. В настоящей работе влияние напряжения затвора описывается влиянием электрического поля на коэффициент сегрегации  $m_{s1}$  ионов  $\text{H}^+$  на МФГ Si–SiO $_2$ . Зависимость  $m_{s1}(E)$  обусловлена влиянием поля на эффективную высоту барьера на МФГ Si–SiO $_2$  для ионов  $\text{H}^+$  и имеет экспоненциальный характер от напряженности электрического поля вида (27). Отметим, что эффективная ширина барьера ( $a = 2.9 \cdot 10^{-8}$  см примерно соответствует структурной толщине переходной области Si–SiO $_2$  ( $\sim 0.3$  нм [29])).

В Р-Д моделях [1–9] полагалось, что релаксация заряда, накопленного при ОТПН, происходит вследствие уменьшения скорости прямой реакции (1) из-за

уменьшения концентрации дырок в кремниевой подложке, а также вследствие обратной диффузии водорода в атомном или молекулярном виде от затвора к МФГ Si–SiO<sub>2</sub>. Как показано в [2,30], эти процессы не позволяют описать экспериментальные зависимости во всем диапазоне времен релаксации. Кроме того, по обратной реакции (1) можно ожидать релаксацию заряда поверхностных состояний, тогда как в ряде экспериментов [1,2,28] наблюдалась преимущественная релаксация объемного заряда. В настоящей модели процесс релаксации объемного заряда описывается туннельной разрядкой положительно заряженных оксидных ловушек электронами кремниевой подложки. Отметим, что найденные параметры туннелирования ( $\beta_0$  и  $E_T$ ) достаточно близки к соответствующим параметрам для туннельной разрядки объемного заряда, введенного ионизирующим облучением, определенным в [31,32].

## 5. Заключение

Разработана новая количественная модель нестабильности МОП-приборов при отрицательном смещении затвора. В основе модели лежит реакция депассивации поверхностных состояний на МФГ Si–SiO<sub>2</sub> и водородо-содержащих дырочных ловушек в SiO<sub>2</sub> положительно заряженными ионами водорода H<sup>+</sup>, накапливающимися в *p*<sup>+</sup>-инверсном слое кремниевой подложки. Зависимости поверхностного и объемного зарядов от времени ОТПН определяются кинетикой диффузии и дрейфа ионов H<sup>+</sup> из *p*<sup>+</sup>-инверсного слоя и объема кремниевой подложки к МФГ Si–SiO<sub>2</sub>. Модель удовлетворительно описывает экспериментальные зависимости поверхностного и объемного зарядов от времени с показателем степени *n*, изменяющимся от 1 при малых временах до ~ 0.1 при больших временах. Квазинасыщение при больших временах связывается с истощением содержания водорода в кремниевой подложке. Влияние напряжения затвора на ОТПН объясняется посредством влияния напряженности электрического поля на коэффициент сегрегации ионов H<sup>+</sup> на МФГ Si–SiO<sub>2</sub>. Релаксация положительного объемного заряда, введенного в подзатворный диэлектрик при ОТПН, описывается туннельной разрядкой оксидных ловушек электронами кремниевой подложки.

## Список литературы

[1] D.K. Schroder. *Microelectron. Reliab.*, **47**, 841 (2007).  
 [2] A.E. Islam, H. Kuffluoglu, D. Varghese, S. Mahapatra, M.A. Alam. *IEEE Trans. Electron. Dev.*, **54**(9), 2143 (2007).  
 [3] S. Mahapatra, N. Parihar. *Microelectron. Reliab.*, **81**, 127 (2018).  
 [4] V. Huard, M. Denais, C. Parthasarathy. *Microelectron. Reliab.*, **46**(1), 1 (2006).  
 [5] J.H. Stathis, S. Zafar. *Microelectron. Reliab.*, **46**(2–4), 270 (2006).

[6] K.O. Jeppson, C.M. Swensson. *J. Appl. Phys.*, **48**(5), 2004 (1977).  
 [7] S. Ogawa, N. Shiono. *Phys. Rev. B*, **51**(7), 4218 (1995).  
 [8] J.B. Yang, T.P. Chen, S.S. Tan, L. Chan. *Phys. Lett.*, **88**, 172109 (2006).  
 [9] H. Kufluoglu, M.A. Alam. *IEEE Trans. Electron Dev.*, **54**(5), 1101 (2007).  
 [10] D. Griscom. *J. Appl. Phys.*, **58**(7), 2524 (1985).  
 [11] R.E. Stahlbush, R.K. Lawrence, H.L. Hughes, N.S. Saks. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **35**(6), 1192 (1988).  
 [12] J.H. Stathis, S. Mahapatra, T. Grasser. *Microelectron. Reliab.*, **81**, 244 (2018).  
 [13] О.В. Александров. *ФТП*, **48**(4), 523 (2014).  
 [14] L. Tsetseris, X.J. Zhou, D.M. Fleetwood, R.D. Schrimpf, S.T. Pantelides. *Appl. Phys. Lett.*, **86**, 142103 (2005).  
 [15] S.T. Pantelides, L. Tsetseris, S.N. Raskeev, X.J. Zhou, D.M. Fleetwood, R.D. Schrimpf. *Microelectron. Reliab.*, **47**, 903 (2007).  
 [16] S.N. Raskeev, D.M. Fleetwood, R.D. Schrimpf, S.T. Pantelides. *Phys. Rev. Lett.*, **87**(16), 165506 (2001).  
 [17] Q.D.M. Khosru, N. Yasuda, K. Taniguchi, C. Hamaguchi. *J. Appl. Phys.*, **76**, 4738 (1994).  
 [18] P.J. McWhorter, S.L. Miller, W.M. Miller. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **37**(6), 1682 (1990).  
 [19] T.R. Oldham, A.J. Leis, F.B. McLean. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **33**(6), 1203 (1986).  
 [20] R. Rizk, P. de Mierry, D. Ballutaud, M. Aucouturier, D. Mathiot. *Phys. Rev. B*, **44**(12), 6141 (1991).  
 [21] J. Zhu, N.M. Johnson, C. Herring. *Phys. Rev. B*, **41**(17), 12354 (1990).  
 [22] A. Stesmans, G. Van Gorp. *Appl. Phys. Lett.*, **57**, 2663 (1990).  
 [23] S.R. Hofstein. *IEEE Trans. Electron Dev.*, **14**(11), 749 (1967).  
 [24] B.J. Fishbein, J.T. Watt, J.D. Plummer. *J. Electrochem. Soc.*, **134**(3), 674 (1987).  
 [25] N. Stojadinovic, D. Dankovic, S. Djoric-Veljkovic, V. Davidovic, I. Manic, S. Golubovic. *Microelectron. Reliab.*, **45**, 1343 (2005).  
 [26] M. Capizzi, A. Mittiga. *Appl. Phys. Lett.*, **50**, 918 (1987).  
 [27] Y.L. Huang, Y. Ma, R. Job, A.G. Ulyashin. *J. Appl. Phys.*, **96**, 7080 (2004).  
 [28] I. Manic, D. Dankovic, S. Djoric-Veljkovic, V. Davidovic, S. Golubovic, N. Stojadinovic. *Microelectron. Reliab.*, **49**, 1003 (2009).  
 [29] Г.Я. Красников, Н.А. Зайцев. *Система кремний-диоксид кремния субмикронных СБИС* (М., Техносфера, 2003) с. 148.  
 [30] K.E. Kambour, C. Kouhestani, D. Nguyen, N. Rosen, R.A.B. Devine. *Appl. Phys. Lett.*, **99**, 083506 (2011).  
 [31] M. Kimura. *J. Appl. Phys.*, **73**(9), 4388 (1993).  
 [32] J.R. Schwank, P.S. Winokur, P.J. McWhorter, F.W. Sexton, P.V. Dressendorfer, D.C. Turpin. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **31**(6), 1434 (1984).

Редактор Г.А. Оганесян

## Model of negative bias temperature instability of $p$ -MOS-transistors

*O.V. Aleksandrov*

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

**Abstract** The new quantitative model of negative bias temperature instability (NBTI) of  $p$ -MOS-transistors is developed. Reaction of depassivation of the surface states on interphase boundary (IFB) Si–SiO<sub>2</sub> and of the hydrogen-related hole traps near IFB Si–SiO<sub>2</sub> by positively charged hydrogen ions H<sup>+</sup> collecting in  $p^+$ -inverse layer of a silicon substrate is the cornerstone of model. Dependences of surface and volume charges in  $p$ -MOS-transistors on time of NBTI are defined by kinetics of diffusion and drift of ions H<sup>+</sup> from a silicon substrate to IFB Si–SiO<sub>2</sub>. Influence of gate voltage on NBTI is explained by means of influence of electric field strength on segregation coefficient of ions H<sup>+</sup> on IFB Si–SiO<sub>2</sub>. The relaxation of the positive volume charge entered into gate dielectric at NBTI is described by a tunnel discharge of oxide traps by electrons of a silicon substrate.