

## Модель поведения МОП структур при ионизирующем облучении

© О.В. Александров<sup>†</sup>

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»,  
197376 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 19 июня 2013 г. Принята к печати 20 августа 2013 г.)

Разработана количественная модель поведения МОП структур при ионизирующем облучении, базирующаяся на захвате дырок водородосодержащими ловушками. Часть довушек заряжается, образуя положительный объемный заряд в диэлектрике. Другая часть распадается с освобождением положительных ионов водорода, которые мигрируют в электрическом поле диэлектрика к межфазной границе с полупроводником, где приводят к депассивации поверхностных состояний. Учитывается зарядение поверхностных состояний как в процессе облучения, так и при измерении порогового напряжения.

### 1. Введение

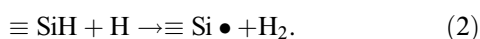
При воздействии ионизирующего облучения в диэлектрике МОП структуры генерируются электронно-дырочные пары. Электроны, обладающие высокой подвижностью в диоксиде кремния, стекают в затвор и в полупроводниковую кремниевую подложку, менее подвижные дырки захватываются на дырочные довушки, образуя положительный объемный заряд (ОЗ) в диэлектрике, а на межфазной границе раздела (МФГ) Si–SiO<sub>2</sub> образуются поверхностные состояния (ПС) (см. монографии [1,2] и обзоры [3,4]). ПС заряжаются положительно или отрицательно в зависимости от положения уровня Ферми и изгиба зон на поверхности кремния [5].

Долгое время считалось, что дырочными ловушками в термическом диоксиде кремния являются E'-центры [6], связанные с кислородными вакансиями в сетке аморфного SiO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> ≡ Si• (знак ≡ означает насыщенные химические связи кремния с тремя атомами кислорода, а знак • означает ненасыщенную оборванную связь кремния). Позже были обнаружены дефекты, связанные с E'-дефектами, содержащие водород [7]. В работах Афанасьева с соавт. [8,9] было показано, а в работе [10] подтверждено, что именно водородосодержащие дефекты O<sub>3</sub> ≡ Si–H являются основными дырочными ловушками в термическом диоксиде кремния.

Поверхностные состояния связываются с так называемыми P<sub>b</sub>-центрами — оборванными кремниевыми связями на МФГ Si–SiO<sub>2</sub> (Si<sub>3</sub> ≡ Si•) [11]. На образование ПС сильное влияние оказывает водород, который либо пассивирует ПС:



либо наоборот их депассивирует [12]:



Именно с диффузией водорода в атомарной (H), ионизированной (H<sup>+</sup>) или молекулярной (H<sub>2</sub>) формах связывалось изменение плотности ПС, наблюдаемое в ряде экспериментов при ионизирующих облучениях и по-

следующих отжигах [13–15]. Для объяснения накопленных экспериментальных данных Мак-Лином [16] была предложена двухстадийная модель образования ПС при ионизирующем облучении. На первой стадии водородосодержащие ловушки в объеме диэлектрика захватывают подвижные дырки, что приводит к освобождению (радиолизу) ионов водорода. На второй стадии ионы водорода мигрируют в электрическом поле диэлектрика, захватываются МФГ Si–SiO<sub>2</sub> и депассивируют ПС по реакции, аналогичной (2). Ионизованная форма водорода позволила Мак-Лину [16] объяснить влияние электрического поля и полярности напряжения на затворе на ряд экспериментальных закономерностей образования ПС. Отметим, что модель Мак-Лина [16] является эмпирической и относится только к образованию ПС. Между тем в ряде работ (см. обзоры [3,4]) отмечалась связь генерации ПС с образованием объемного заряда в диоксиде кремния при облучении и последующих отжигах.

Попытки количественного учета образования ПС при расчете изменения порогового напряжения МОП структур под действием ионизирующего излучения предпринимались в работах Левина с соавт. [17,18]. В работе [17], как и в других ранних работах (см. [1,2]), образование ПС связывалось с захватом дырок напряженными связями на МФГ Si–SiO<sub>2</sub>. Полагалось, что плотность ПС изменяется синхронно с плотностью объемного заряда в оксиде с коэффициентом пропорциональности, зависящим от дозы облучения. В работе [18] ПС были смоделированы ступенчатым распределением дырочных ловушек вблизи МФГ Si–SiO<sub>2</sub> шириной 10 нм с концентрацией 10<sup>20</sup>–10<sup>21</sup> см<sup>-3</sup>. Отметим, что по данным ряда экспериментальных работ (см. обзоры [3,4]) ПС и ОЗ, хотя и взаимно связаны, однако могут вести себя по-разному как при облучении, так и при последующих отжигах. Кроме того, в работах [17,18] не учитывалась важная роль водорода в образовании как ПС, так и объемного заряда.

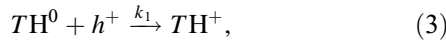
Цель данной работы заключается в разработке количественной модели совместного образования ПС и объемного заряда в МОП структурах с учетом радиолиза водорода при ионизирующем облучении.

<sup>†</sup> E-mail: Aleksandr\_ov@mail.ru

## 2. Описание модели

В термическом диоксиде кремния, полученном окислением в сухом или влажном кислороде, содержится высокая концентрация водорода в связанном состоянии (до  $10^{19} - 10^{20} \text{ см}^{-3}$  [13,14]). Водород накапливается в объеме диэлектрика, захватываясь на дефекты структуры аморфного  $\text{SiO}_2$ , а также вблизи МФГ  $\text{Si-SiO}_2$ , пассивируя ПС по реакции, аналогичной (1).

Полагаем, что дырки, образующиеся в диоксиде кремния при ионизирующем облучении, захватываются на нейтральные водородосодержащие ловушки  $T\text{H}^0$ , где  $T$  — дефект структуры диоксида кремния типа  $\text{O}_3 \equiv \text{Si}$ . При этом, если энергия дырки меньше энергии связи  $\text{Si-H}^0$ , то происходит захват дырки и водородосодержащие ловушки заряжаются, образуя положительный ОЗ:

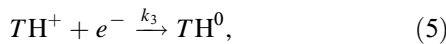


где  $k_1$  — константа скорости реакции (3). Если же энергия дырки больше энергии связи  $\text{Si-H}^0$ , тогда захват дырки стимулирует разрыв водородной связи и образование свободного положительного иона водорода (протона), как в модели МакЛина [16], по реакции



где  $k_2$  — константа скорости реакции (4).

Положительно заряженный дефект  $T\text{H}^+$  может являться кулоновским центром захвата электронов, образующихся наряду с дырками в диоксиде кремния при ионизирующем облучении. При захвате электрона дефект нейтрализуется:

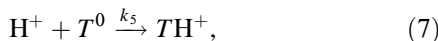


где  $k_3$  — константа скорости реакции (5).

Свободная водородная ловушка  $T^0$  может одновременно являться и дырочной ловушкой:



где  $k_4$  — константа скорости реакции (6). Положительный ион водорода подвижен в диоксиде кремния при комнатной температуре и может быть захвачен обратно на свободную водородную ловушку:



где  $k_5$  — константа скорости реакции (7). Этот захват замедляет миграцию ионов водорода в диэлектрике.

Ионы водорода диффундируют и дрейфуют в электрическом поле к МФГ  $\text{Si-SiO}_2$ , где взаимодействуют с пассивированными ПС, приводя к их депассивации по реакции, аналогичной (2). Возможные реакции с образованием или участием нейтрального атомного или молекулярного водорода не рассматриваем, поскольку образование ПС зависит от полярности напряжения на затворе [16].

Диффузионно-реакционные уравнения и уравнение Пуассона, описывающие приведенные выше процессы в диоксиде кремния, имеют вид

$$\frac{\partial p}{\partial t} = D_p \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} - \mu_p \frac{\partial}{\partial x} (pE) + G - (k_1 + k_2)C_{T\text{H}}^0 p - k_4 C_T^0 p, \quad (8)$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} = D_n \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} + \mu_n \frac{\partial}{\partial x} (nE) + G - k_3 C_{T\text{H}}^+ n, \quad (9)$$

$$\frac{\partial C_{\text{H}}^+}{\partial t} = D_{\text{H}}^+ \frac{\partial^2 C_{\text{H}}^+}{\partial x^2} - \mu_{\text{H}}^+ \frac{\partial}{\partial x} (C_{\text{H}}^+ E) + k_2 C_{T\text{H}}^0 p - k_5 C_T^0 C_{\text{H}}^+, \quad (10)$$

$$\frac{\partial C_{T\text{H}}^+}{\partial t} = k_1 C_{T\text{H}}^0 p - k_3 C_{T\text{H}}^+ n + k_5 C_T^0 C_{\text{H}}^+, \quad (11)$$

$$\frac{\partial C_{T\text{H}}^0}{\partial t} = -(k_1 + k_2) C_{T\text{H}}^0 p + k_3 C_{T\text{H}}^+ n, \quad (12)$$

$$\frac{\partial C_T^0}{\partial t} = k_2 C_{T\text{H}}^0 p - k_4 C_T^0 p - k_5 C_T^0 C_{\text{H}}^+, \quad (13)$$

$$\frac{\partial C_T^+}{\partial t} = k_4 C_T^0 p, \quad (14)$$

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = -\frac{q}{\varepsilon \varepsilon_0} (C_{T\text{H}}^+ + C_T^+ + C_{\text{H}}^+ + p - n), \quad (15)$$

где  $x$  — координата, отсчитываемая от границы диоксида с кремнием;  $t$  — время облучения;  $n$  и  $p$  — концентрации свободных электронов и дырок соответственно;  $D_n$  и  $D_p$  — коэффициенты диффузии электронов и дырок соответственно;  $\mu_n$  и  $\mu_p$  — подвижности электронов и дырок соответственно ( $\mu_n = 20 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ ,  $\mu_p = 4 \cdot 10^{-6} \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ );  $D_{\text{H}}^+$  — коэффициент диффузии ионов водорода ( $D_{\text{H}}^+ = 1.0 \exp(-0.76/kT) \text{ см}^2/\text{с}$  [19]),  $k$  — постоянная Больцмана,  $T$  — абсолютная температура),  $\mu_{\text{H}}^+$  — подвижность ионов водорода;  $V$  — распределение потенциала в диоксиде кремния,  $E$  — напряженность электрического поля в диэлектрике,  $E = -dV/dx$ ;  $q$  — заряд электрона;  $\varepsilon$  — относительная диэлектрическая проницаемость диоксида кремния ( $\varepsilon = 3.9$ );  $\varepsilon_0$  — диэлектрическая проницаемость вакуума,  $G$  — 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:  $G = F k_g f_y(E)$ . Темп генерации рассчитывался по [20] при коэффициенте генерации электронно-дырочных пар рентгеновским излучением,  $k_g = 1.4 \cdot 10^{-6} \text{ Кл} \cdot \text{см}^{-3}/\text{рад}$ .

Уравнения (7)–(13) решались при граничных условиях, соответствующих бесконечно большой скорости захвата свободных носителей и ионов водорода на обеих границах:

$$n(0, t) = n(d, t) = p(0, t) = p(d, t) = 0, \quad (16)$$

$$C_{\text{H}}^+(0, t) = C_{\text{H}}^+(d, t) = 0, \quad (17)$$

где  $x = 0$  соответствует границе оксида с кремнием, а  $x = d$  соответствует границе оксида с затвором ( $d$  — толщина диэлектрика).

К затвору относительно подложки приложено напряжение  $V_g$ :

$$V(0, t) = 0, \quad V(0, d) = V_g. \quad (18)$$

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

$$\begin{aligned} n(x, 0) = p(x, 0) = C_H^+(x, 0) = C_{TH}^+(x, 0) \\ = C_T^0(x, 0) = C_T^+(x, 0) = 0, \end{aligned} \quad (19)$$

кроме концентрации водородосодержащих дырочных ловушек, распределение которых по толщине оксида полагается однородным:

$$C_{TH}^0(x, 0) = C_{TH0}^0. \quad (20)$$

Сдвиг порогового напряжения под действием облучения ( $\Delta V_{th}$ ) складывается из объемной ( $\Delta V_{ot}$ ) и поверхностной ( $\Delta V_{it}$ ) составляющих:

$$\Delta V_{th} = \Delta V_{ot} + \Delta V_{it} = (Q_{ot} \pm Q_{it})/C_{ox}, \quad (21)$$

где  $Q_{ot}$  — эффективный объемный заряд (ОЗ):  $Q_{it}$  — заряд на ПС; знак минус соответствует  $n$ -канальным, а знак плюс —  $p$ -канальным МОП транзисторам;  $C_{ox}$  — удельная емкость диоксида,  $C_{ox} = \epsilon \epsilon_0/d$ . Эффективный объемный заряд рассчитывается по формуле

$$Q_{ot} = q \int_0^d \rho(1 - x/d) dx, \quad (22)$$

где  $\rho$  — плотность объемного заряда,  $\rho = C_{TH}^+ + C_H^+ + p - n$ .

Полагаем, что количество ПС, образующихся при облучении, определяется суммарным потоком ионизованного водорода на МФГ Si–SiO<sub>2</sub>, т.е. каждый ион водорода, стекающий на МФГ Si–SiO<sub>2</sub>, приводит к депассивации одного ПС:

$$N_{it} = \int_0^t j_H^+(0, t) dt, \quad (23)$$

где  $j_H^+(0, t)$  — поток ионизованного водорода на межфазную границу Si–SiO<sub>2</sub> (при  $x = 0$ ):

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

Заряд на поверхностных состояниях зависит от поверхностного потенциала, уровня и типа легирования кремниевой подложки, а также от распределения ПС по энергиям. Последнее полагалось равномерным по ширине запрещенной зоны кремния. В модели учитывалось зарядение ПС в процессе облучения:

$$Q_{it}' = -qN_{it}(\varphi_s - \varphi_b)/E_g, \quad (24)$$

где  $\varphi_s$  — поверхностный потенциал,  $\varphi_b$  — объемный потенциал,  $\varphi_b = kT \ln(N/n_i)$ ,  $N$  — уровень легирования

кремниевой подложки,  $n_i$  — собственная концентрация носителей в кремнии ( $n_i = 1.4 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$  при 300 К),  $E_g$  — ширина запрещенной зоны Si ( $E_g = 1.12 \text{ эВ}$  при 300 К). Поверхностный потенциал в процессе облучения находится из условия

$$V_g = \varphi_s - \varphi_{ms} = (Q_{ot} + Q_{it}')/C_{ox}, \quad (25)$$

$\varphi_{ms}$  — контактная разность потенциалов металл–полупроводник. При измерении порогового напряжения МОП транзистора (условие сильной инверсии,  $\varphi_s = 2\varphi_b$ ) выражение для поверхностного заряда имеет вид

$$Q_{it} = -qN_{it}\varphi_b/E_g. \quad (26)$$

Параметрами модели, помимо исходной концентрации водородосодержащих дырочных ловушек  $C_{TH0}^0$ , являются константы скоростей реакций (3)–(6), которые при диффузионном ограничении определяются коэффициентами диффузии подвижных компонентов:  $k_1 = 4\pi r_1 D_p$ ,  $k_2 = 4\pi r_2 D_p$ ,  $k_3 = 4\pi r_3 D_n$ ,  $k_4 = 4\pi r_4 D_H^+$ , где  $r_1$ – $r_4$  — радиусы захвата дырок, электронов и ионов водорода соответственно. Радиусы захвата электронов и дырок связаны с соответствующими сечениями захвата соотношениями:  $\sigma_{pi} = k_i/(v_{th} D_p/D_n)$ , ( $i = 1, 2, 4$ );  $\sigma_{n3} = k_3/v_{th}$ , где  $v_{th}$  — тепловая скорость электронов ( $v_{th} \cong 10^7 \text{ см/с}$ ),  $\sigma_p$  и  $\sigma_n$  — сечения захвата дырок и электронов соответственно. Учитывалась зависимость от напряженности электрического поля сечений захвата дырок в виде [21]

$$\sigma_p(E) = \sigma_{p0}(1 + 1.9 \cdot 10^{-4} E^{0.55})^{-1} \quad (27)$$

и сечений захвата электронов в виде [22]

$$\sigma_n(e) = \sigma_{n0}(1 + 8.7 \cdot 10^{-17} E^{2.865})^{-1}, \quad (28)$$

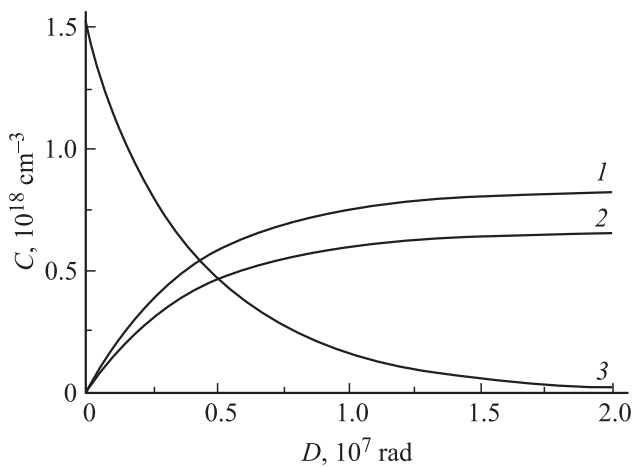
где  $\sigma_{p0}$  и  $\sigma_{n0}$  — сечения захвата дырок и электронов в слабых полях.

### 3. Расчеты по модели

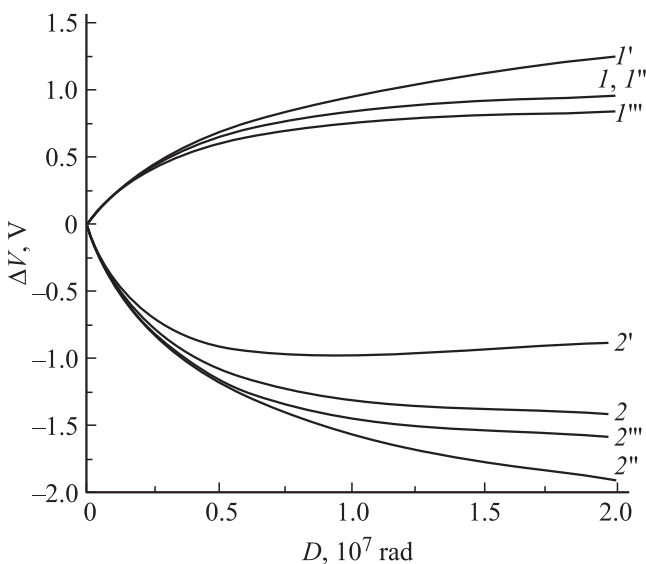
Уравнения модели (8)–(15) с граничными условиями (16)–(18), начальными условиями (19), (20), с учетом (21)–(28) решались численно с использованием неявной разностной схемы. С увеличением дозы облучения происходит изменение концентраций компонентов (рис. 1). Концентрации положительно заряженных водородосодержащих ловушек (кривая 1) и нейтральных водородных ловушек (кривая 2) растут с выходом на насыщение, а концентрация нейтральных водородосодержащих ловушек (кривая 3) падает. Концентрация положительных ионов водорода падает от  $10^{12}$  до  $10^{11} \text{ см}^{-3}$ , концентрации дырок и электронов практически не меняются, имея уровни  $10^8$  и  $2 \cdot 10^1 \text{ см}^{-3}$  соответственно.

Изменение концентраций компонентов приводит к изменению порогового напряжения (рис. 2). С увеличением дозы облучения наблюдается рост поверхностной (кривая 1)  $V_{it}$  и модуля объемной  $|V_{ot}|$  (кривая 2)

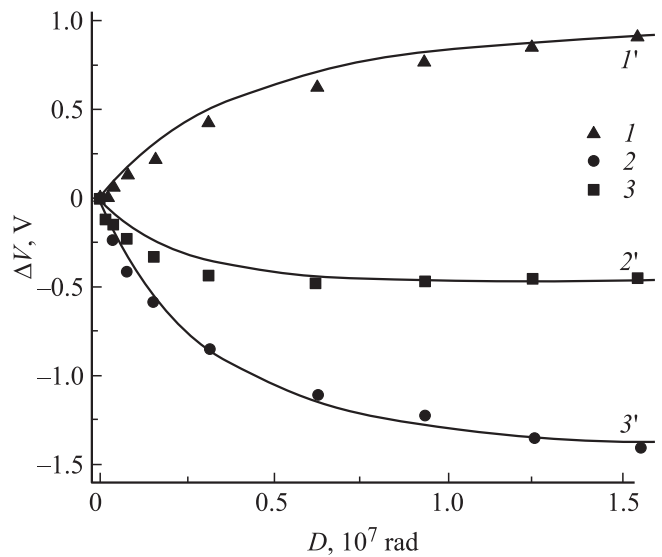
составляющих порогового напряжения с тенденцией их насыщения при больших дозах. Анализ решения показал, что исходная концентрация водородосодержащих дырочных ловушек  $C_{TH0}^0$  определяет суммарную амплитуду насыщения  $|V_{ot}|$  и  $V_{it}$  при больших дозах облучения. Константа скорости  $k_1$  реакции (3) отвечает за скорость нарастания и относительную амплитуду насыщения  $|V_{ot}|$ . Константа скорости  $k_2$  реакции (4) определяет скорость нарастания и относительную амплитуду насыщения  $V_{it}$ . Реакция (5) приводит к частичной нейтрализации объемного заряда, уменьшая  $|V_{ot}|$  и увеличивая долю  $V_{it}$



**Рис. 1.** Расчетные дозовые зависимости концентраций компонентов:  $C_{TH}^+$  (1),  $C_T^0$  (2),  $C_{TH}^0$  (3) при  $x = 0.5d$  (параметры модели как на рис. 3).



**Рис. 2.** Расчетные дозовые зависимости поверхностной  $V_{it}$  (1, I', I'', I''') и объемной  $V_{ot}$  (2, 2', 2'', 2''') составляющих порогового напряжения  $n$  МОПТ при: 1, 2 —  $\sigma_{n03} = \sigma_{p04} = r_5 = 0$ ; I', 2' —  $\sigma_{n03} = 1.6 \cdot 10^{-12} \text{ см}^2$ ,  $\sigma_{p04} = r_5 = 0$ ; I'', 2'' — при  $\sigma_{n03} = r_5 = 0$ ,  $\sigma_{p04} = 2.8 \cdot 10^{-14} \text{ см}^2$ ; I''', 2''' —  $\sigma_{n03} = \sigma_{p04} = 0$ ,  $r_5 = 2 \cdot 10^{-6} \text{ см}$  (остальные параметры как на рис. 3).



**Рис. 3.** Дозовые зависимости  $V_{it}$  (1, I'),  $V_{ot}$  (2, 2') и  $V_{th}$  (3, 3')  $n$  МОПТ ( $d = 27.4 \text{ нм}$ ,  $V_g = +5.5 \text{ В}$ ). 1–3 — эксперимент [22]; I'–3' — расчет модели при  $C_{TH0}^0 = 1.5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ,  $\sigma_{p01} = 10.5 \cdot 10^{-14} \text{ см}^2$ ,  $\sigma_{p02} = 8.4 \cdot 10^{-14} \text{ см}^2$ ,  $\sigma_{n03} = \sigma_{p04} = r_5 = 0$ .

при больших дозах облучения (кривые I' и 2'). Реакция (6) приводит к увеличению  $|V_{ot}|$  при больших дозах облучения, не меняя  $V_{it}$  (кривые I'' и 2''). Реакция (7) оказывает заметное влияние только при очень больших  $r_5$  (кривые I''' и 2'''), приводя к уменьшению доли  $V_{it}$  и соответствующему увеличению доли  $V_{ot}$ . Зависимость  $V_{ot}$  и  $V_{it}$  от толщины диэлектрика имеет квадратичный характер ( $\Delta V \propto d^2$ ), что соответствует середине интервала литературных экспериментальных данных для показателя степени ( $\Delta V \propto d^k$ ,  $k = 1-3$  [4]).

Анализировались экспериментальные дозовые зависимости  $V_{ot}$  и  $V_{it}$ , приведенные в работе [22] для  $n$ -канальных МОП транзисторов с алюминиевым затвором и толщиной термического подзатворного оксида  $d = 27.4 \text{ нм}$ , подвергнутых рентгеновскому облучению (10 кэВ) при напряжении на затворе  $V_g = +5.5 \text{ В}$ . На рис. 3 представлены экспериментальные данные [22] и результаты моделирования при следующих значениях параметров:  $C_{TH0}^0 = 1.5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ,  $\sigma_{p01} = 10.5 \cdot 10^{-14} \text{ см}^2$ ,  $\sigma_{p02} = 8.4 \cdot 10^{-14} \text{ см}^2$ . Поскольку в эксперименте [22] наблюдалась тенденция к насыщению  $V_{ot}$  и  $V_{it}$  при больших дозах, принималось  $k_3 = k_4 = 0$ . Реакция (7) слабо влияла на результат моделирования, поэтому полагалось также  $k_5 = 0$ . Как видно из рисунка, расчет достаточно хорошо описывает экспериментальные данные.

#### 4. Обсуждение

В описанной модели полагается, что дырочными ловушками являются водородосодержащие дефекты  $TH^0$  ( $O_3 \equiv Si-H$ ), как это было показано в работах [8–10].

Эти ловушки, заряжаясь по реакции (3), образуют положительный объемный заряд (ОЗ) в диэлектрике. Часть этих ловушек при захвате дырок распадается, давая положительно заряженные ионы водорода по реакции (4), которые, стекая на МФГ Si–SiO<sub>2</sub>, депассивируют ПС. Соотношение между константами скоростей реакций (3) и (4) определяет соотношение между объемной и поверхностной составляющими порогового напряжения  $V_{ot}$  и  $V_{it}$ .

При больших дозах облучения имеет место насыщение обеих дозовых зависимостей  $V_{ot}$  и  $V_{it}$  (см. рис. 3). В работе [22] насыщение порогового напряжения объяснялось установлением равновесия между заполнением дырочных ловушек и рекомбинацией радиационно-введенных электронов с захваченными дырками. В рамках настоящей модели учет рекомбинации электронов с захваченными дырками по реакции (5) должен был бы приводить к уменьшению  $|V_{ot}|$  и росту  $V_{th}$  при больших дозах облучения (см. кривые 1' и 2' на рис. 2). В предлагаемой модели насыщение дозовых зависимостей  $V_{ot}$  и  $V_{it}$  обусловлено истощением исходных водородосодержащих ловушек  $TN^0$  (кривая 3 на рис. 1), являющихся источником как ОЗ (по реакции (3)), так и ПС (по реакции (4)). По причине насыщения дозовых зависимостей  $V_{ot}$  и  $V_{it}$  в эксперименте [22], в расчетах не учитывалась реакция (5) захвата электронов положительно заряженными водородосодержащими дефектами ( $k_3 = 0$ ), а также реакция (6) захвата дырок нейтральными ловушками  $T^0$  ( $k_4 = 0$ ), поскольку реакция (5) должна была приводить к уменьшению ОЗ (кривая 2' на рис. 2), а реакция (7) — к росту ОЗ (кривая 2'' на рис. 2) при больших дозах облучения.

Отметим, что в модели не учитываются возможные реакции с образованием или участием нейтрального атомарного или молекулярного водорода. Это связано с влиянием полярности напряжения на затворе на образование ПС [16] — при достаточно большом отрицательном напряжении на затворе образование ПС подавляется, что свидетельствует о доминирующей роли положительно заряженных подвижных частиц ( $H^+$ ) в образовании ПС. Этот вывод подтверждается также результатами изохронных отжига после  $\gamma$ -облучения в работе [23]. В области комнатных температур отжига плотность образующихся ПС при положительном  $V_g$ , обусловленная дрейфом  $H^+$ , составляла более 90%, а при отрицательном  $V_g$ , обусловленная дрейфом  $H^0$ , составляла менее 10%.

В модели учтено зарядение ПС, образующихся в процессе облучения. Учет зарядения ПС существенно влияет на дозовые зависимости  $V_{it}$  и  $V_{th}$ , поскольку влияет на величину напряженности электрического поля в диэлектрике.

Исходная концентрация дырочных ловушек в диоксиде кремния зависит от технологии его получения. Найденное значение  $C_{TN^0}^0 = 1.5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  примерно соответствует литературному интервалу для концентрации дырочных ловушек в термическом диоксиде крем-

ния [24]. Сечения захвата дырочных ловушек при слабых полях в реакциях (3) и (4),  $\sigma_{p01} = 10.5 \cdot 10^{-14} \text{ см}^2$  и  $\sigma_{p02} = 8.4 \cdot 10^{-14} \text{ см}^2$ , превышают соответствующее значение, найденное в работе [21] ( $\sigma_{p0} = 1.4 \cdot 10^{-14} \text{ см}^2$ ), но лежат внутри более широкого интервала литературных значений ( $\sigma_{p0} = 10^{-14} - 10^{-13} \text{ см}^2$  [24,25]). Разница в значениях сечений захвата дырок может быть связана, в том числе, с неоднородным распределением концентрации водородосодержащих ловушек по толщине диоксида кремния. В описанной модели при задании начального распределения концентрации водородосодержащих ловушек в виде спадающей от МФГ Si–SiO<sub>2</sub> экспоненты при сохранении их интегрального количества:

$$C_{TN}^0(x, 0) = C_{TN^0}^0(d/l) \exp(-x/l),$$

при  $l = 0.1d$  получаем сечения захвата дырок,  $\sigma_{p01} = 5.6 \cdot 10^{-14} \text{ см}^2$  и  $\sigma_{p02} = 7 \cdot 10^{-14} \text{ см}^2$ , меньше, чем при однородном распределении.

## 5. Заключение

Разработана количественная модель влияния ионизирующего облучения на МОП структуры, учитывающая накопление заряда в объеме диэлектрика и на поверхностных состояниях. Объемный заряд образуется вследствие захвата дырок на водородосодержащие ловушки в диоксиде кремния. Плотность ПС определяется суммарным потоком положительных ионов водорода на МФГ Si–SiO<sub>2</sub>, освобождающихся при захвате дырок водородосодержащими ловушками. В модели учтено зарядение ПС как в процессе облучения, так и при измерении порогового напряжения после облучения.

Проведено сравнение расчета по модели с экспериментальными зависимостями сдвига порогового напряжения от дозы рентгеновского облучения. Показано, что учет образования поверхностных состояний и их зарядения позволяют описать дозовые зависимости объемной и поверхностной составляющих порогового напряжения  $n$ -МОП-транзисторов. Рассчитанные по модели значения концентраций дырочных ловушек и их сечений захвата находятся в интервале литературных данных.

Автор благодарит В.В. Афанасьева за полезные замечания.

## Список литературы

- [1] Ф.П. Коршунов, Ю.В. Богатырев, В.А. Вавилов. *Воздействие радиации на интегральные микросхемы* (Минск, Наука и техника, 1986).
- [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] H.L. Hughes, J.M. Benedetto. IEEE Trans. Nucl. Sci., **50** (3), 500 (2003).

- [5] В.А. Гуртов. *Твердотельная электроника* (М., Техносфера, 2008) с. 67.
- [6] P.M. Lenahan. P.V. Dressendorfer. *Appl. Phys.*, **55**, 3495 (1984).
- [7] B.B. Triplett, T. Takahashi, T. Sugano. *Appl. Phys. Lett.*, **50**, 1163 (1987).
- [8] V.V. Afanas'ev, A.J. Stesmans. *Phys.: Condens Matter*, **12**, 2285 (2000).
- [9] V.V. Afanas'ev, G.J. Andriaenssens, A.J. Stesmans. *Microelectron. Eng.*, **59**, 85 (2001).
- [10] A. Rivera, A. van Veen, J.M.M. de Nijs, P. Balk. *Sol. St. Electron.*, **46**, 1775 (2002).
- [11] Y. Nishi. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **10**, 52 (1971).
- [12] E. Cartier, J.H. Stathis, D.A. Buchanan. *Appl. Phys. Lett.*, **63**, 1510 (1993).
- [13] D.L. Griscom. *Appl. Phys.*, **58**, 2524 (1985).
- [14] A.G. Revesz. *Electrochem. Soc.*, **126**, 122 (1979).
- [15] B.J. Mrstik, R.W. Bendell. *J. Appl. Phys.*, **59**, 3012 (1991).
- [16] F.B. McLean. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **NS-27** (6), 1651 (1980).
- [17] М.Н. Левин, А.В. Татаринцев, В.А. Макаренко, В.Р. Гитлин. *Микроэлектроника*, **35** (6), 382 (2006).
- [18] М.Н. Левин, А.В. Татаринцев, Е.В. Бондаренко, В.Р. Гитлин, В.А. Макаренко, А.Е. Бормонтов. *Вестн. ВГУ. Сер. Физика и математика*, № 2, 30 (2008).
- [19] S.R. Hofstein. *IEEE Trans. Electron. Dev.*, **11** (11), 749 (1967).
- [20] J.M. Benedetto, H.E. Boech. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **33** (6), 1318 (1986).
- [21] R.J. Krantz, L.W. Aulerman, T.C. Sietlow. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **34** (6), 1196 (1987).
- [22] H.E. Boech, F.B. McLean, J.M. Benedetto, J.M. McGarrity. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **33** (6), 1191 (1986).
- [23] N.S. Saks, R.B. Klein, D.L. Griscom. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **35** (6), 1234 (1988).
- [24] А.П. Барабан, В.В. Булавинов, П.П. Коңоров. *Электроника слоев SiO<sub>2</sub> на кремнии* (Л., Изд-во ЛГУ, 1988).
- [25] А.М. Емельянов. *ФТТ*, **52** (6), 1060 (2010).

Редактор Т.А. Полянская

## Model of MOS structures behaviour at an ionizing irradiation

O.V. Aleksandrov

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

**Abstract** The quantitative model of MOS structures behaviour at the ionizing irradiation is developed, based on capture of holes by hydrogen containing traps. The part of traps is charged, forming a positive volume charge in dielectric. Other part breaks up with releasing of positive hydrogen ions which migrate in an electric field of dielectric to interphase boundary with the semiconductor where lead depassivation of surface states. Charging of surface states both during an irradiation and during measurement of a threshold voltage is taken into account.