

## Модель поведения МОП-структур при радиационно-термических обработках

© О.В. Александров, С.А. Мокрушина

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“,  
197376 Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: Aleksandr\_ov@mail.ru

Поступило в Редакцию 15 июля 2024 г.

В окончательной редакции 19 сентября 2024 г.

Принято к публикации 26 сентября 2024 г.

Разработана количественная модель влияния радиационно-термических обработок на стойкость МОП-структур к ионизирующему облучению. В основе модели лежат реакции взаимодействия дырок, образующихся при ионизирующем облучении, с водородосодержащими и безводородными ловушками в подзатворном диэлектрике. Захват дырок водородосодержащими ловушками стимулирует разрыв водородной связи и превращение их в безводородные ловушки с меньшим сечением захвата. Модель позволила описать повышение радиационной стойкости МОП-структур при последовательных циклах облучение–отжиг при сохранении интегральной концентрации ловушек.

**Ключевые слова:** МОП-структуры, радиационно-термические обработки, ионизирующее облучение, радиационная стойкость.

DOI: 10.61011/JTF.2024.11.59101.234-24

### Введение

При воздействии ионизирующего облучения (ИО) в диэлектрике МОП-структур генерируются электронно-дырочные пары. Электроны, обладающие высокой подвижностью в диоксиде кремния, стекают в затвор и в полупроводниковую кремниевую подложку, а менее подвижные дырки захватываются на дырочные ловушки, образуя положительный объемный заряд в диэлектрике (см. монографии [1,2] и обзоры [3–5]). На межфазной границе (МФГ) Si–SiO<sub>2</sub> образуются поверхностные состояния [3–5].

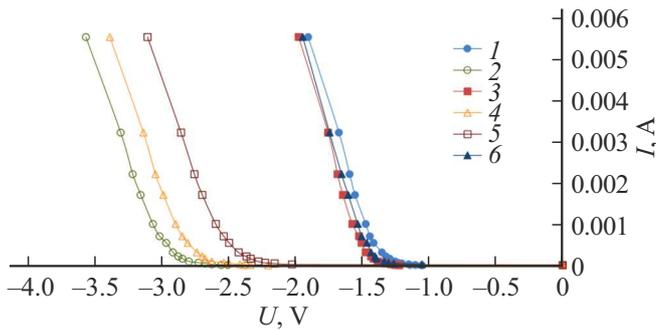
Одним из способов повышения радиационной стойкости кремниевых МОП интегральных схем являются радиационно-термические обработки (РТО) (ИО + отжиг) [6–8]. Эффект связывался с релаксацией механических напряжений при ионизирующем облучении (ИО) в результате разрыва валентных связей Si–O. При последующей термообработке происходит восстановление разорванных связей с образованием более стабильной атомной структуры диоксида кремния [6,8]. Показано, однако, что воздействие ИО на МОП-структуры не связано с прямым взаимодействием радиации с межфазной границей Si–SiO<sub>2</sub> или структурной модификацией SiO<sub>2</sub>, а связано с генерацией электронно-дырочных пар и транспортом дырок [9]. В работе [8] полагалось, что наблюдаемое при РТО смещение сток-затворных характеристик МОП-транзисторов связано с уменьшением плотности ловушечных центров в оксиде кремния. Однако в ряде работ [10–12] было показано, что изменение сдвига напряжения плоских зон МОП-структур или порогового напряжения МОП-транзисторов при отжиге после ИО связано с релакса-

цией накопленного при ИО положительного объемного заряда при сохранении плотности ловушечных центров. С учетом этого обстоятельства, полагаем, что причиной повышения радиационной стойкости МОП-структур при РТО может быть преобразование водородосодержащих ловушек в безводородные ловушки с меньшим сечением захвата.

Целью настоящей работы является разработка количественной модели поведения МОП-структур при РТО на основе механизма преобразования водородосодержащих ловушек в безводородные.

### 1. Описание эксперимента

Для исследования использовались *n*- и *p*-канальные МОП-транзисторы, изготовленные по стандартной планарной технологии с поликремниевым затвором. Подзатворный оксид толщиной 120 nm выращивался в атмосфере сухого кислорода с добавлением паров HCl при температуре 1050°C в течение 80 min. Облучение проводилось на установке ГОТ с источником  $\gamma$ -излучения <sup>137</sup>Cs ( $E_\gamma = 0.66$  MeV) при мощности излучения 80 rad/s. Облучение проводилось дозой  $D = 10^6$  rad (SiO<sub>2</sub>) с контролем порогового напряжения при дозе  $5 \cdot 10^4$  rad. На каждом этапе облучения–отжига снимались сток-затворные характеристики и определялся сдвиг порогового напряжения. Разделение сдвига порогового напряжения на объемную  $\Delta V_{ot}$  и поверхностную  $\Delta V_{it}$  составляющие проводилось методом середины заперенной зоны [13]. Отжиги после ИО проводились при температуре 400°C в течение 30 min. Влияние



**Рис. 1.** Влияние циклов облучение–отжиг на сток-затворные характеристики  $p$ -МОП-транзисторов: **1** — исходная характеристика; **2** — после первого облучения ( $D = 10^6$  рад); **3** — после первого отжига; **4** — после третьего облучения; **5** — после шестого облучения; **6** — после шестого отжига.

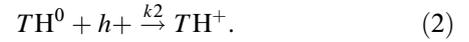
циклов облучение–отжиг на сток-затворные характеристики  $p$ -МОП транзисторов показано на рис. 1.

Как видно из рисунка, с увеличением числа циклов сдвиг порогового напряжения в результате облучения уменьшается (кривые 2, 4, 5). Каждый отжиг приводит к возвращению сток-затворных характеристик (кривые 3, 6) практически до первоначальной (кривая 1). Т.е. при используемом отжиге происходит полное восстановление объемного заряда и поверхностных состояний, введенных облучением. Отметим, что, как показано в [14], облучение МОП-структур  $\gamma$ -квантами с энергией  $\sim 1$  MeV эквивалентно низкоэнергетическому (10 keV) рентгеновскому облучению, т.е. является ионизирующим и не приводит к генерации дефектов смещения и пар Френкеля в подзатворном диэлектрике  $\text{SiO}_2$ .

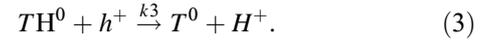
## 2. Описание модели

При воздействии ионизирующего облучения в подзатворном диэлектрике МОП-структуры генерируются подвижные носители заряда — электроны и дырки, которые взаимодействуют со структурными дефектами — электронными и дырочными ловушками. В аморфном термическом диоксиде кремния  $\text{SiO}_2$  основными структурными дефектами являются кислородные вакансии  $\text{O}_3 \equiv \text{Si} \bullet$  (знак  $\equiv$  означает насыщенные химические связи кремния с тремя атомами кислорода, а знак  $\bullet$  — ненасыщенную оборванную связь кремния) [15]. В термическом диоксиде кремния содержится высокая концентрация водорода (до  $10^{19} - 10^{20} \text{ cm}^{-3}$  [16,17]). Взаимодействуя с дефектами структуры ( $T$ ), водород образует водородосодержащие центры ( $\text{TH}$ ). Показано [18,19], что такие водородосодержащие дефекты  $\text{O}_3 \equiv \text{Si}-\text{H}$  являются основными дырочными ловушками в термическом диоксиде кремния. При ИО в подзатворном диэлектрике происходят следующие реакции. При захвате дырок безводородными и водородосодержащими ловушками

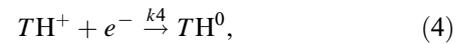
образуется положительный объемный заряд:



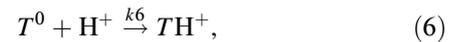
Захват дырки водородосодержащими ловушками стимулирует разрыв водородной связи и преобразование их в безводородные ловушки с освобождением положительного иона водорода:



Положительно заряженные дефекты  $\text{TH}^+$  и  $T^+$  становятся электронными ловушками:



Ион водорода, образующийся по реакции (3), может быть захвачен обратно на ловушку  $T^0$ :



что замедляет миграцию ионов водорода в диоксиде.

Процессы (1)–(6) описываются следующей системой диффузионно-кинетических уравнений и уравнения Пуассона:

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial t} = D_p \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} - \mu_p \frac{\partial}{\partial x} (pE) \\ - (k_2 - k_3) C_{\text{TH}}^0 p - k_3 C_T^0 p + G, \end{aligned} \quad (7)$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} = D_n \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} + \mu_n \frac{\partial}{\partial x} (nE) - (k_4 C_{\text{TH}}^+ + k_5 C_T^+) n + G, \quad (8)$$

$$\frac{\partial C_{\text{H}}^+}{\partial t} = D_{\text{H}}^+ \frac{\partial^2 C_{\text{H}}^+}{\partial x^2} - \mu_{\text{H}}^+ \frac{\partial}{\partial x} (C_{\text{H}}^+ E) + k_2 C_{\text{TH}}^0 p - k_6 C_T^0 C_{\text{H}}^+, \quad (9)$$

$$\frac{\partial C_{\text{TH}}^+}{\partial t} = k_2 C_{\text{TH}}^0 p - k_4 C_{\text{TH}}^+ n + k_6 C_T^0 C_{\text{H}}^+, \quad (10)$$

$$\frac{\partial C_{\text{TH}}^0}{\partial t} = -(k_2 + k_3) C_{\text{TH}}^0 p + k_4 C_{\text{TH}}^+ n, \quad (11)$$

$$\frac{\partial C_T^0}{\partial t} = k_3 C_{\text{TH}}^0 p - k_1 C_T^0 p - k_6 C_T^0 C_{\text{H}}^+, \quad (12)$$

$$\frac{\partial C_T^+}{\partial t} = k_1 C_T^0 p, \quad (13)$$

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = -\frac{q}{\epsilon \epsilon_0} (C_{\text{TH}}^+ + C_T^+ + C_{\text{H}}^+ + p - n), \quad (14)$$

где  $x$  — координата, отсчитываемая от границы диоксида с кремнием ( $0 \leq x \leq d$ ,  $d$  — толщина диэлектрика);  $t$  — время облучения;  $n$  и  $p$  — концентрации электронов и дырок соответственно;  $D$  и  $\mu$  с соответствующими индексами — коэффициенты диффузии и подвижности подвижных компонентов ( $\mu_n = 20 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ ,  $\mu_p = 4 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ ),

$D_H^+ = 1.0 \cdot \exp(-0.73/kT) \text{ cm}^2/\text{s}$  [20],  $k$  — постоянная Больцмана,  $T$  — абсолютная температура),  $V$  — потенциал,  $E$  — напряженность электрического поля,  $E = -dV/dx$ ;  $q$  — заряд электрона;  $\varepsilon$  — относительная диэлектрическая проницаемость диоксида кремния ( $\varepsilon = 3.9$ );  $\varepsilon_0$  — электрическая постоянная,  $G$  — темп генерации электронно-дырочных пар при ИО, который определяется мощностью радиационной дозы  $F$ , коэффициентом генерации электронно-дырочных пар  $k_g$  и вероятностью разделения пар электрическим полем до их начальной рекомбинации:  $G = F \cdot k_g \cdot f_y(E)$  [14].

Граничные условия для подвижных компонентов соответствуют поглощающим межфазным границам при  $x = 0$  и  $x = d$ :

$$n(0, t) = n(d, t) = p(0, t) = p(d, t) = 0, \quad (15)$$

$$C_H^+(0, t) = C_H^+(d, t) = 0. \quad (16)$$

Напряжение на затворе без подачи внешнего смещения соответствует контактной разнице потенциалов затвора и подложки,  $V_g = \varphi$  (полагали  $\varphi = 0.5 \text{ V}$ ):

$$V(0, t) = 0, \quad V(d, t) = \varphi. \quad (17)$$

В начальный момент времени концентрации всех компонентов нулевые:

$$n(x, 0) = p(x, 0) = C_{TH}^+(x, 0) = C_T^+(x, 0) = C_H^+(x, 0) = 0, \quad (18)$$

кроме исходных концентраций водородосодержащих и безводородных дырочных ловушек, распределенных экспоненциально вблизи межфазной границы (МФГ) Si-SiO<sub>2</sub>:

$$C_{TH0}^0(x, 0) = \frac{Q_{TH0}^0}{l} \exp\left(-\frac{x}{l}\right), \quad (19)$$

$$C_{T0}^0(x, 0) = \frac{Q_{T0}^0}{l} \exp\left(-\frac{x}{l}\right), \quad (20)$$

где  $Q_{TH0}^0$  и  $Q_{T0}^0$  — начальные интегральные концентрации (количества) водородосодержащих и безводородных ловушек,  $l$  — ширина распределения (полагалось  $l = 5 \text{ nm}$ ). Сдвиг порогового напряжения за счет образования объемного заряда под действием ИО определяется выражением

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

где  $Q_{ot}$  — эффективный объемный заряд,

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

$C_{ox}$  — удельная емкость диэлектрика,  $C_{ox} = \varepsilon\varepsilon_0/d$ ,  $\rho$  — плотность объемного заряда,  $\rho = C_{TH}^+ + C_T^+ + C_H^+ + p - n$ .

Полагаем, что при используемых после ИО отжигах в соответствии с рис. 1 происходит полная релаксация объемного заряда:

$$TH^+ \rightarrow TH^0, \quad T^+ \rightarrow T^0 \quad (23)$$

и полный уход подвижных ионов водорода из объема диэлектрика МОП-структуры:

$$C_H^+ = 0 \quad (24)$$

при сохранении суммарной интегральной концентрации ловушек ( $Q_{TH} + Q_T$ ).

Параметрами модели являются константы скоростей реакций (1)–(6):  $k_i = \sigma_{pi} V_{th}(D_p/D_n)$ ,  $i = 1, 2, 3$ ;  $k_{4,5} = \sigma_{n4,5} V_{th}$ ,  $k_6 = 4\pi r_6 D_H^+$ , где  $V_{th}$  — тепловая скорость электронов ( $V_{th} \cong 10^7 \text{ cm/s}$ ),  $\sigma_p$  и  $\sigma_n$  — сечения захвата дырок и электронов (в слабых полях  $\sigma_p = 1.4 \cdot 10^{-14} \text{ cm}^2$ ,  $\sigma_n = 1.6 \cdot 10^{-12} \text{ cm}^2$  [21,22]);  $r_6$  — радиус захвата. Полагаем  $\sigma_{p2} = \sigma_{p3} = \sigma_p$ ,  $\sigma_{n4} = \sigma_{n5} = \sigma_n$ ,  $r_6 = 10 \text{ \AA}$ . Помимо дырочных ловушек с относительно большим сечением захвата ( $\sigma_p \cong 10^{-14} \text{ cm}^2$ ), в термическом оксиде кремния обнаружены центры с меньшим сечением захвата ( $\sigma_p \cong 10^{-15} \text{ cm}^2$ ) [23]. Полагаем, что такое сечение захвата имеют безводородные центры  $T^0$ , т.е.  $\sigma_{p1} = 10^{-15} \text{ cm}^2$ .

### 3. Расчеты по модели и их обсуждение

Уравнения модели (7)–(14) с граничными условиями (15)–(17), начальными условиями (18)–(20), с учетом (21)–(24) решались численно с использованием явных и неявных разностных схем.

Зависимость количества центров  $TH^0$ ,  $TH^+$ ,  $T^0$  и  $T^+$  и ионов водорода  $H^+$  от числа циклов облучение–отжиг  $N$  показана на рис. 2. Как видно из рисунка, после каждого цикла происходит уменьшение количества центров  $TH^0$  (1) и  $TH^+$  (2) и увеличение количества центров  $T^0$  (3) и  $T^+$  (4). Это происходит вследствие уменьшения количества ионов водорода  $H^+$  в объеме диэлектрика (5), стекающих на МФГ SiO<sub>2</sub>-Si (подложка)

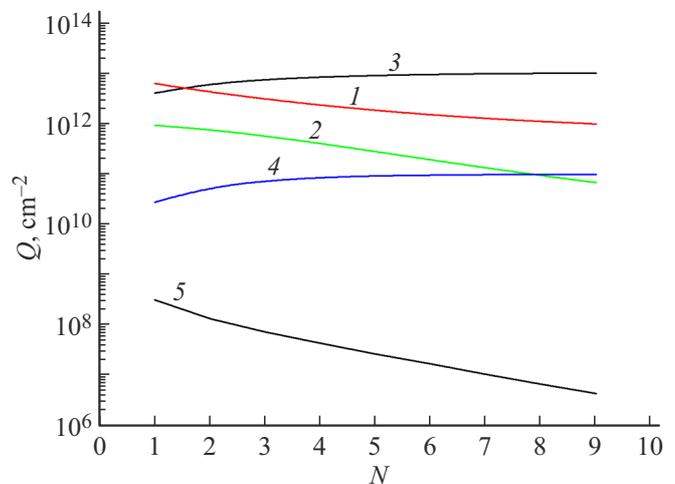
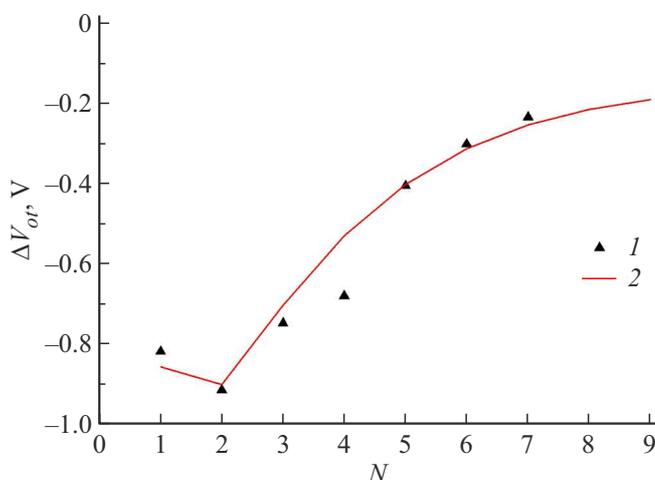


Рис. 2. Влияние числа циклов облучение–отжиг на количество центров  $TH^0$  (1),  $TH^+$  (2),  $T^0$  (3),  $T^+$  (4) и  $H^+$  (5) (параметры модели даны в подписи к рис. 3).

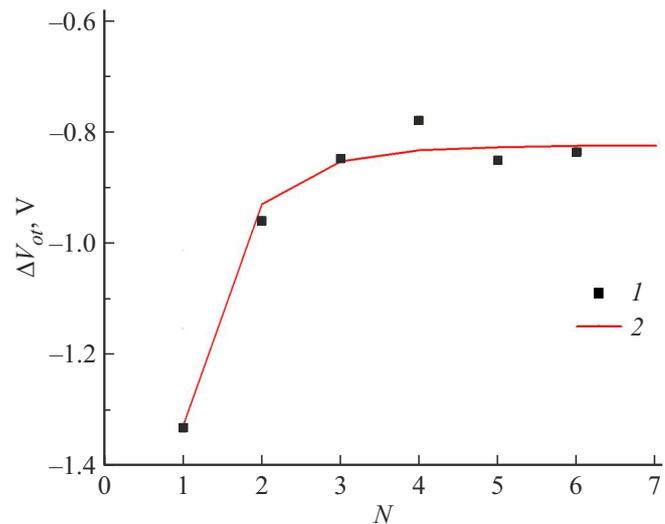
и МФГ SiO<sub>2</sub>-затвор как при ИО, так и особенно при термоотжигах. Т.е. происходит преобразование ТН-центров в Т-центры при сохранении их суммарного количества. Количество заряженных Т<sup>+</sup> центров после восьми циклов становится больше количества заряженных ТН<sup>+</sup> центров.

На рис. 3 проведено сравнение экспериментальной зависимости сдвига порогового напряжения (точки 1), усредненного для *n*- и *p*-МОПТ, с расчетной зависимостью (кривая 2) при начальном количестве водородосодержащих ловушек  $Q_{TH0}^0 = 1.1 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$  и отсутствии безводородных ловушек  $Q_{T0}^0 = 0$ . Как видно из рисунка, при увеличении числа циклов облучение–отжиг, начиная со второго, наблюдается уменьшение сдвига порогового напряжения (по абсолютной величине) при ИО с тенденцией выхода на постоянный уровень. Это объясняется тем, что водород, освобождающийся при ИО по реакции (3), уходит на обе МФГ при ИО и последующих термоотжигах, что ускоряет превращение водородосодержащих ловушек в безводородные. Отметим, что сдвиг поверхностной составляющей порогового напряжения весьма мал ( $\Delta V_{it} \approx 0.06 \text{ V}$ ) и мало меняется при увеличении числа циклов. Это можно объяснить тем, что при промежуточных отжигах (400°C, 30 min) поверхностные состояния полностью исчезают (т.е. не накапливаются).

Модель позволяет также описать экспериментальные данные работы [7], в которой циклы облучение–отжиг проводились на МОП-структурах с Al-затвором. Оксид толщиной 35 nm получался термическим окислением при температуре 900°C в сухом кислороде с 3% HCl. Рентгеновское облучение проводилось с мощностью 200 Krad/min в течение 5 min. Температура и время отжигов составляли 400°C и 30 min. На рис. 4 показаны экспериментальные (точки 1) и расчетные (кривая 2) зависимости сдвига напряжения плоских зон от числа циклов облучение–отжиг при начальном количестве



**Рис. 3.** Зависимость сдвига порогового напряжения от числа циклов облучение–отжиг: 1 — эксперимент, 2 — расчет по модели при  $Q_{TH0}^0 = 1.1 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ ,  $Q_{T0}^0 = 0$ ,  $d = 120 \text{ nm}$ .



**Рис. 4.** Зависимость сдвига напряжения плоских зон от числа циклов облучение–отжиг: 1 — эксперимент [7], 2 — расчет по модели при  $Q_{TH0}^0 = 8 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ ,  $Q_{T0}^0 = 3.4 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ ,  $d = 35 \text{ nm}$ .

водородосодержащих ловушек  $Q_{TH0}^0 = 8 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ , а безводородных —  $Q_{T0}^0 = 3.4 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ . Как видно из рисунка, расчет по модели удовлетворительно описывает экспериментальные данные работы [7].

Зависимость сдвига порогового напряжения от числа циклов облучение–отжиг после некоторого числа циклов, зависящего от количества водородосодержащих ловушек ( $N = 7$  при  $Q_{TH0}^0 = 1.1 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$  на рис. 3 и  $N = 3$  при  $Q_{TH0}^0 = 8 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$  на рис. 4) выходит на постоянный уровень. Относительная величина постоянного уровня определяется соотношением начальных концентраций водородосодержащих и безводородных ловушек.

## Заключение

Разработана количественная модель поведения МОП-структур при РТО. Модель основана на захвате дырок, образующихся при ИО, безводородными и водородосодержащими ловушками. Согласно модели, захват дырок водородосодержащими ловушками стимулирует разрыв водородной связи и превращение их в безводородные ловушки с меньшим сечением захвата. При последующих термоотжигах объемный заряд релаксирует, а образующийся при ИО свободный водород покидает МОП-структуру. Модель позволяет описать экспериментальные данные по повышению радиационной стойкости МОП-структур при последовательных циклах облучение–отжиг при сохранении интегральной концентрации ловушек.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] К.И. Таперо, В.Н. Улимов, А.М. Членов. *Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах космического применения* (БИНОМ, М., 2012)
- [2] В.С. Першенков, В.Д. Попов, А.В. Шальнов. *Поверхностные радиационные эффекты в ИМС* (Энергоатомиздат, М., 1988)
- [3] T.R. Oldham, F.D. McLean. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **50** (3), 483 (2003). DOI: 10.1109/TNS.2003.812927
- [4] J.R. Schwank, M.R. Shaneyfelt, D.M. Fleetwood, J.A. Felix, P.E. Dodd, P. Paillet, V. Ferlet-Cavrois. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **55** (4), 1833 (2008). DOI: 10.1109/TNS.2008.2001040
- [5] D.M. Fleetwood. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **65** (8), 1465 (2018). DOI: 10.1109/TNS.2017.2786140
- [6] В.Д. Попов, Г.А. Протопопов. *Радиационно-термическая обработка МОП-приборов и интегральных схем* (Palmarium Academic Press, 2013)
- [7] J.-G. Hwu, Sh.-L. Fu. *Solid-State Electron.*, **32** (8), 615 (1989). DOI: 10.1016/0038-1101(89)90139-1
- [8] Г.М. Воронкова, В.Д. Попов, Г.А. Протопопов. *ФТП*, **41** (8), 977 (2007). DOI: 10.1134/S1063782607080179
- [9] P.S. Winokur, M.M. Sokoloski. *Appl. Phys. Lett.*, **28** (10), 627 (1976). DOI: 10.1063/1.88592
- [10] P.J. McWhorter, S.L. Miller, W.M. Miller. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **37** (6), 1682 (1990). DOI: 10.1109/23.101177
- [11] A.J. Leis, T.R. Oldham, H.E. Boesch, F.B. McLean. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **36** (6), 1808 (1989). DOI: 10.1109/23.45373
- [12] О.В. Александров. *ФТП*, **55** (2), 152 (2021). DOI: 10.21883/FTP.2022.12.54516.3947
- [13] P.J. McWhorter, P.S. Winokur. *Appl. Phys. Lett.*, **48** (2), 133 (1986). DOI: 10.1063/1.96974
- [14] J.M. Benedetto, H.E. Boesch. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **33** (6), 1318 (1986). DOI: 10.1109/TNS.1986.4334599
- [15] P.M. Lenahan, P.V. Dressendorfer. *J. Appl. Phys.*, **55** (10), 3495 (1984). DOI: 10.1063/1.332937
- [16] D.L. Griscom. *J. Appl. Phys.*, **58** (7), 2524 (1985). DOI: 10.1063/1.335931
- [17] A.G. Revesz. *J. Electrochem. Soc.*, **126** (1), 122 (1979). DOI: 10.1149/1.2128967
- [18] V.V. Afanas'ev, G.J. Andriaenssens, A. Stesmans. *Microelectron. Eng.*, **59** (1–4), 85 (2001). DOI: 10.1016/S0167-9317(01)00651-7
- [19] A. Rivera, A. van Veen, H. Schut, J.M.M. de Nijs, P. Balk. *Solid State Electron.*, **46** (11), 1775 (2002). DOI: 10.1016/S0038-1101(02)00150-8
- [20] S.R. Hofstein. *IEEE Trans. Electron Dev.*, **11** (11), 749 (1967). DOI: 10.1109/TED.1967.16102
- [21] R.J. Krantz, L.W. Aukerman, T.C. Zietlow. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **34** (6), 1196 (1987). DOI: 10.1109/TNS.1987.4337452
- [22] H.E. Boesch, F.B. McLean, J.M. Benedetto, J.M. McGarrity. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **33** (6), 1191 (1986). DOI: 10.1109/TNS.1986.4334577
- [23] J.F. Zhang, H.K. Sii, G. Groeseneken, R. Degraeve. *IEEE Trans. El. Dev.*, **48** (6), 1127 (2001). DOI: 10.1109/16.925238