

## Модель асимметричного сдвига порогового напряжения МОП-структур при термополевых обработках

О. В. Александров, Н. Н. Морозов 

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ"  
им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

 [laughter-maiden@mail.ru](mailto:laughter-maiden@mail.ru)

### Аннотация

**Введение.** При термополевых обработках (ТПО) МОП-структур наблюдается нестабильность порогового напряжения, связанная с транспортом подвижных ионов примесей щелочноземельных металлов (в основном  $\text{Na}^+$ ) в электрическом поле подзатворного диэлектрика. Экспериментальные кинетики накопления и восстановления подвижного заряда при ТПО отклоняются от известных моделей: диффузионной модели Сноу и модели пограничного захвата Хофстейна.

**Цель работы.** Разработка количественной модели поведения МОП-структур при термополевых обработках в режимах накопления и восстановления подвижного заряда ионной примеси.

**Материалы и методы.** Модель базируется на анализе кинетики захвата подвижных ионов примеси на потенциально-энергетические ловушки в объеме аморфного подзатворного диэлектрика. На основе анализа физических процессов составлена система дифференциальных уравнений, которая решается методом конечных разностей по явной и неявной разностным схемам.

**Результаты.** Из сопоставления расчетов по модели с литературными экспериментальными данными для временных зависимостей смещения порогового напряжения МОП-структур при положительном и последующем отрицательном смещении затвора определены: диапазон энергий связи, характеристическая энергия дисперсии, концентрации ионов примеси и ловушек вблизи затвора и кремниевой подложки, а также ширина области их локализации. Обнаружено уменьшение диапазона энергий связи вблизи межфазной границы  $\text{SiO}_2\text{-Si}$  по сравнению с межфазной границей  $\text{SiO}_2\text{-металлический затвор}$ , что может свидетельствовать о наличии упорядоченного тонкого слоя  $\text{SiO}_2$  вблизи кремния.

**Заключение.** Показано, что процесс восстановления заряда происходит с большей скоростью, чем процесс накопления, вследствие различия в распределениях ловушек вблизи межфазных границ  $\text{SiO}_2$  с кремниевой подложкой и с затвором. Предложенная модель позволяет описать экспериментальное асимметричное поведение МОП-структур, загрязненных ионами щелочноземельных металлов при ТПО.

**Ключевые слова:** МОП-структура, подзатворный диэлектрик, подвижный заряд, термополевая обработка, дисперсионный транспорт

**Для цитирования:** Александров О. В., Морозов Н. Н. Модель асимметричного сдвига порогового напряжения МОП-структур при термополевых обработках // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2025. Т. 28, № 2. С. 69–79.

doi: 10.32603/1993-8985-2025-28-2-69-79

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 02.09.2024; принята к публикации после рецензирования 25.12.2024; опубликована онлайн 30.04.2025



## Modeling Asymmetric Shift in the Threshold Voltage of MOS Structures under Thermal Field Treatment

Oleg V. Aleksandrov, Nikita N. Morozov ✉

Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

✉ laughter-maiden@mail.ru

### Abstract

**Introduction.** Thermal field treatment (TFT) of MOS structures causes instability of the threshold voltage associated with the transport of mobile ions of alkaline earth metal impurities (mainly  $\text{Na}^+$ ) in the electric field of the gate dielectric. Experimental kinetics of accumulation and restoration of the mobile charge during TFT deviate from the known descriptions by Snow's diffusion and Hofstein's boundary capture models.

**Aim.** Development of a quantitative model for the behavior of MOS structures during thermal field treatment in the modes of accumulation and restoration of the mobile charge of an ionic impurity.

**Materials and methods.** The model is based on the analysis of the capture kinetics of mobile impurity ions on polyenergetic traps in the volume of an amorphous gate dielectric. Following the analysis of physical processes, a system of differential equations is compiled and solved by the finite difference method using explicit and implicit difference schemes.

**Results.** The conducted comparison of the data calculated by the developed model and the experimental data reported in literature for the time dependencies of the threshold voltage shift of MOS structures with positive and subsequent negative gate bias determined the range of binding energies, the characteristic dispersion energy, the concentrations of impurity ions and traps near the gate and the silicon substrate, and the width of the region of their localization. A decrease in the range of binding energies in the vicinity of the  $\text{SiO}_2$ -Si interface compared to the  $\text{SiO}_2$ -metal gate interface was found, which may indicate the presence of an ordered thin  $\text{SiO}_2$  layer in the vicinity of silicon.

**Conclusion.** It was shown that the charge recovery process occurs at a higher rate than the accumulation process due to the difference in the distribution of traps in the vicinity of the interphase boundaries of  $\text{SiO}_2$  with the silicon substrate and with the gate. The proposed model can be used to describe the experimental asymmetric behavior of MOS structures contaminated with alkaline earth metal ions during TFT.

**Keywords:** MOS structure, gate dielectric, mobile charge, thermal field treatment, dispersion transport

**For citation:** Aleksandrov O. V., Morozov N. N. Modeling Asymmetric Shift in the Threshold Voltage of MOS Structures under Thermal Field Treatment. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2025, vol. 28, no. 2, pp. 69–79.

doi: 10.32603/1993-8985-2025-28-2-69-79

**Conflict of interest.** The authors declare no conflicts of interest.

Submitted 02.09.2024; accepted 25.12.2024; published online 30.04.2025

**Введение.** Материал данной статьи был представлен на XIII Всероссийской научно-технической конференции "Электроника и микроэлектроника СВЧ" в виде тезисов.

При термополевых обработках (ТПО) МОП-структур с положительным напряжением на затворе может наблюдаться нестабильность порогового напряжения (Positive Bias Temperature Instability – PBTI) [1, 2]. Явление связывается с транспортом подвижных ионов примесей щелочноземельных металлов (в основном  $\text{Na}^+$ ) от затвора к кремниевой подложке в электрическом поле подзатворного диэлектрика. Для описания

кинетики накопления подвижного заряда при ТПО были предложены две основные модели: диффузионная модель Сноу [3] и модель пограничного захвата (Interface Trapping Model) Хофштейна [4]. В первой модели перенос подвижного заряда от затвора к Si-подложке определяется скоростью диффузии и дрейфа свободных ионов примеси в диэлектрике. Величина накопленного подвижного заряда пропорциональна корню квадратному из времени ТПО:

$$Q \sim \sqrt{t}. \quad (1)$$

Во второй модели скорость накопления за-

ряда определяется скоростью освобождения примеси с межфазной границы (МФГ) диэлектрика с затвором. В этом случае

$$Q = Q_0 [1 - \exp(-t/\tau)], \quad (2)$$

где  $Q_0$  – начальный заряд;  $\tau$  – постоянная времени ( $\tau^{-1} = \nu \exp(-E/(kT))$ ), где  $\nu$  – частотный фактор;  $E$  – энергия связи;  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – абсолютная температура).

При смене полярности происходит уменьшение (восстановление) заряда у Si-подложки вследствие его обратного перемещения к затвору. По диффузионной модели оно должно происходить с той же скоростью, что и накопление (симметричное поведение), а по модели пограничного захвата восстановление должно происходить значительно быстрее, чем накопление (асимметричное поведение), вследствие высокой скорости транспорта свободной примеси. На практике наблюдается как асимметричное (в обычных оксидах), так и симметричное (в хлорированных оксидах) поведение, причем кинетики накопления и восстановления отклоняются от простых зависимостей (1) и (2) [3, 4].

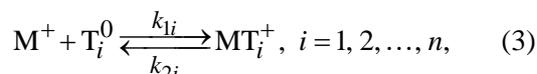
Отклонение может быть связано с захватом примеси на ловушки, находящиеся в объеме диэлектрика и приводящие к замедлению скорости переноса ионов примеси [5]. Причем в структуре аморфного диоксида кремния ловушки могут быть полиэнергетическими, т. е. иметь разброс (дисперсию) по энергиям связи.

Полиэнергетичность ловушек связана с нарушением дальнего порядка в структуре аморфного  $\text{SiO}_2$  вследствие разброса диэлектрических углов между тетраэдрами  $\text{SiO}_4$  в диапазоне  $120 \dots 180^\circ$  [6]. Это приводит к дисперсии энергий связи ионов примеси с дефектами и к дисперсионному характеру транспорта примеси. Дисперсионный транспорт в неупорядоченных материалах описывается моделью случайных блужданий с непрерывным временем [7], а также эквивалентной ей моделью многократного захвата [8–10].

Цель статьи – разработка модели поведения МОП-структур при ТПО, учитывающей многократный захват примеси на полиэнергетические ловушки в объеме аморфного подзатворного диэлектрика, и описание поведения МОП-

структур при ТПО в режимах накопления и восстановления подвижного заряда.

**Модель.** В подзатворном диэлектрике МОП-структуры – аморфном диоксиде кремния  $\text{SiO}_2$  имеются нарушения структуры, которые служат полиэнергетическими ловушками для подвижных ионов примеси. Полагаем, что транспорт подвижных (mobile) ионов примеси  $M^+$  в объеме диоксида кремния сопряжен с многократным захватом на нейтральные полиэнергетические ловушки (traps)  $T_i^0$  с образованием положительно заряженных комплексов  $MT_i^+$ :



где  $k_{1i}$  и  $k_{2i}$  – константы скоростей прямой и обратной реакций примеси с  $i$ -й ловушкой. Система диффузионно-дрейфовых уравнений непрерывности с учетом реакции (3) и уравнения Пуассона, описывающая транспорт ионов примеси, принимает вид

$$\frac{\partial C_{M^+}}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C_{M^+}}{\partial x^2} - \mu \frac{\partial}{\partial x} (C_{M^+} E) - C_{M^+} \sum_{i=0}^n k_{1i} C_{T_i^0} + \sum_{i=0}^n k_{2i} C_{MT_i^+}; \quad (4)$$

$$\frac{\partial C_{MT_i^+}}{\partial t} = - \frac{\partial C_{T_i^0}}{\partial t} = = k_{1i} C_{M^+} C_{T_i^0} - k_{2i} C_{MT_i^+}, \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad (5)$$

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = - \frac{\rho}{\epsilon \epsilon_0} = - \frac{q}{\epsilon \epsilon_0} \left( C_{M^+} + \sum_{i=1}^n C_{MT_i^+} \right), \quad (6)$$

где  $C_{M^+}$  – концентрация свободных (не захваченных на ловушки) ионов примеси  $M^+$ ;  $t$  – время ТПО;  $D = \mu \frac{kT}{q}$  – коэффициент диффузии свободных ионов ( $q$  – элементарный заряд);  $x$  – координата по толщине оксида  $d$  от  $x = 0$  на МФГ Si– $\text{SiO}_2$  и  $x = d$  на МФГ  $\text{SiO}_2$ –затвор;  $\mu = \mu_0 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right)$  – подвижность свободных ионов ( $\mu_0$  – предэкспоненциальный множитель;  $E_a$  – энергия активации);  $E = -\frac{dV}{dx}$  –

напряженность;  $C_{Ti}^0$  – концентрация  $i$ -х нейтральных ловушек  $T_i^0$ ;  $C_{MT_i^+}$  – концентрация  $i$ -х положительно заряженных комплексов  $MT_i^+$ ;  $V$  – потенциал;  $\epsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость ( $\epsilon(\text{SiO}_2) = 3.9$ );  $\epsilon_0$  – электрическая постоянная.

Полагаем, что скорость захвата ионов примеси одинакова для различных ловушек и при диффузионном приближении константа скорости прямой реакции (3) определяется коэффициентом диффузии свободных ионов

$$k_{1i} = k_1 = 4\pi RD,$$

где  $R \approx 1 \text{ \AA}$  – эффективный радиус захвата иона на ловушку. Константа скорости обратной реакции определяется энергией связи иона с  $i$ -й ловушкой  $E_{bi}$ :

$$k_{2i} = \nu \exp\left(-\frac{E_{bi}}{kT}\right),$$

где  $\nu = 10^{12} \text{ с}^{-1}$  – частота колебаний атомов. Энергия связи равномерно распределена внутри диапазона от  $E_{b1}$  до  $E_{bn}$ :

$$E_{bi} = E_{b1} + \Delta E_{bi}(i-1), \quad i = 1, 2, \dots, n,$$

где  $\Delta E_{bi} = \frac{E_{bn} - E_{b1}}{n}$  – приращение по энергии.

Полагаем, что распределение ловушек по энергиям имеет экспоненциальный вид, характерный для неупорядоченных материалов [11]:

$$\frac{\partial C_{Ti}(x, E_{bi})}{\partial E_{bi}} = C_{Ti}(x) \frac{1}{E_0} \exp\left(-\frac{E_{bi}}{E_0}\right), \quad (7)$$

$$i = 1, 2, \dots, n,$$

где  $C_{Ti}(x, E_{bi})\Delta E_{bi}$  – концентрация ловушек с энергиями в диапазоне от  $E_{bi}$  до  $E_{bi} + \Delta E_{bi}$ ;  $E_0$  – характеристическая энергия;

$$C_T(x) = \frac{Q'_{T \text{ Si}}}{L_{\text{Si}}} \exp\left(-\frac{x}{L_{\text{Si}}}\right) + \frac{Q'_{T \text{ Me}}}{L_{\text{Me}}} \exp\left(-\frac{d-x}{L_{\text{Me}}}\right) \quad (8)$$

– распределение ловушек по координате, которое

полагаем экспоненциальным вблизи обеих МФГ, где  $Q'_{T \text{ Si}}$ ,  $Q'_{T \text{ Me}}$  – соответственно, интегральные концентрации ловушек вблизи МФГ Si–SiO<sub>2</sub> и МФГ SiO<sub>2</sub>–затвор без учета дисперсии по энергиям;  $L_{\text{Si}}$ ,  $L_{\text{Me}}$  – ширины соответствующих экспоненциальных распределений.

Просуммировав уравнения (8) по энергиям, заменив сумму на интеграл, найдем выражение для суммарной концентрации ловушек в выбранном диапазоне  $E_{b1} \dots E_{bn}$ :

$$C_{T \text{ sum}}(x) = \sum_{i=1}^n C_{Ti}(x, E_{bi})\Delta E_{bi} =$$

$$= \int_{E_{b1}}^{E_{bn}} C_{Ti}(x, E_{bi})dE_{bi} =$$

$$= C_T(x) \left[ \exp\left(-\frac{E_{b1}}{E_0}\right) - \exp\left(-\frac{E_{bn}}{E_0}\right) \right]. \quad (9)$$

Интегральные концентрации ловушек в этом диапазоне из (9):

$$Q_{T \text{ Si}} = Q'_{T \text{ Si}} \left[ \exp\left(-\frac{E_{b1}}{E_0}\right) - \exp\left(-\frac{E_{bn}}{E_0}\right) \right], \quad (10)$$

$$Q_{T \text{ Me}} = Q'_{T \text{ Me}} \left[ \exp\left(-\frac{E_{b1}}{E_0}\right) - \exp\left(-\frac{E_{bn}}{E_0}\right) \right]. \quad (11)$$

Полагаем, что в начальный момент времени компоненты реакции (3) находятся в равновесном состоянии:

$$k_1 C_{Ti}^0 C_{M^+} = k_{2i} C_{MT_i^+}, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (12)$$

Граничные условия принимались аналогичными граничным условиям модели для моноэнергетических ловушек [5] – отражение подвижных ионов примеси на МФГ и постоянное напряжение на затворе  $V_g$ :

$$j(0, t) = j(d, t) = 0; \quad (13)$$

$$V(d, t) = V_g, \quad (14)$$

где  $j$  – поток примесных ионов

$$\left( j(x, t) = -D \frac{\partial C_{M^+}}{\partial x} + \mu C_{M^+} E \right).$$

Сдвиг порогового напряжения при ТПО  $\Delta V_{th}$  определяется выражением

$$\Delta V_{th}(t) = \frac{q}{C_{ox}} \int_0^d \left[ \left( C_{M^+}(x, t) + C_{MT_i^+}(x, t) \right) - \left( C_{M^+}(x, 0) + C_{MT_i^+}(x, 0) \right) \right] \frac{d-x}{d} dx,$$

где  $C_{ox} = \frac{\epsilon\epsilon_0}{d}$  – удельная емкость диэлектрика.

**Результаты.** Система уравнений модели (4)–(6) с начальными условиями (8)–(11), граничными условиями (13), (14) с учетом (7) и (12) решалась численно с использованием явных и неявных разностных схем. Подвижность ионов  $Na^+$  в  $SiO_2$  бралась по данным работы [12], в которой определялась методом термостимулированного ионного тока (TSIC),  $\mu_0 = 1.05 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ ,  $E_a = 0.66 \text{ эВ}$ . Число энергетических уровней ловушек  $n$  внутри диапазона задавалось не менее 30, тогда решение переставало зависеть от  $n$ . Результаты расчетов сравнивались с экспериментальными данными из [4] и [13].

В [13] МОП-структура имела алюминиевый затвор, а подзатворный оксид создавался термическим окислением кремниевой подложки ориентации (100) при температуре  $1150 \text{ }^\circ\text{C}$  и имел толщину  $120 \text{ нм}$ . Структуры загрязнялись натрием в процессе напыления Al в количестве  $\sim 10^{12} \text{ см}^{-2}$ . ТПО осуществлялась при температуре  $\theta = 75, 120$  и  $175 \text{ }^\circ\text{C}$  при смещении затвора:  $V_g = +2 \text{ В}$  – в режиме накопления заряда;  $V_g = -1 \text{ В}$  – в режиме восстановления.

На рис. 1 представлены кинетики изменения порогового напряжения в режиме накопления при

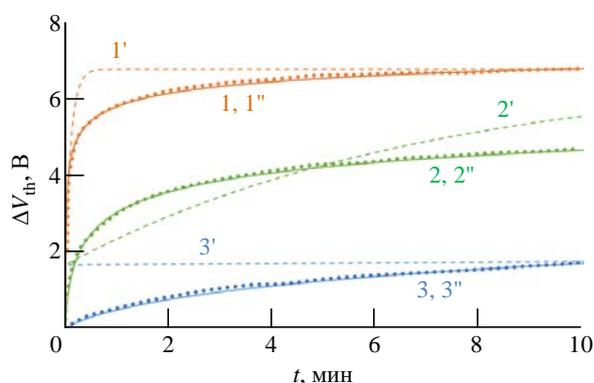


Рис. 1. Кинетики изменения порогового напряжения в режиме накопления при положительном смещении затвора для структур эксперимента [13]

Fig. 1. Kinetics of changes in threshold voltage in accumulation mode with positive gate bias for experimental structures [13]

положительном смещении затвора: экспериментальные [13] (кривые 1–3), рассчитанные при моноэнергетических ( $Q_{M^+Me} = 1.25 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ ;  $Q_{TMe} = 9.4 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ ;  $E_b = 1.14 \text{ эВ}$ ) ловушках (кривые 1'–3') и при полиэнергетических ( $Q_{M^+Me} = 1.4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ ;  $Q_{TMe} = 6.09 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ ;  $E_{b1} = 0.66 \text{ эВ}$ ;  $E_{bn} = 1.4 \text{ эВ}$ ;  $E_0 = 0.25 \text{ эВ}$ ) ловушках (кривые 1''–3''), расположенных у затвора. Ширина экспоненциального распределения вблизи затвора  $L_{Me} = 2 \text{ нм}$  была выбрана исходя из того, что при отрицательном напряжении смещение порогового напряжения при ТПО не наблюдается (в данном случае смещение составляло всего  $\Delta V_{th} = 3 \text{ мВ}$  при  $\theta = 120 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $V_g = -2 \text{ В}$ ). Ширина распределения ловушек у кремния принималась равной ширине распределения ловушек у затвора  $L_{Si} = L_{Me} = 2 \text{ нм}$ .

Как видно из рис. 1, расчет при моноэнергетических ловушках (кривые 1'–3') не позволяет описать эксперимент [13] (кривые 1–3), в то время как расчет при полиэнергетических ловушках (кривые 1''–3'') дает хорошее соответствие с экспериментальными зависимостями.

В [4] подзатворный оксид выращивался в сухом кислороде при температуре  $1100 \text{ }^\circ\text{C}$  и имел толщину  $100 \text{ нм}$ . Структуры загрязнялись перед металлизацией затвора выдержкой в концентрированном растворе хлорида натрия в количестве  $\sim 10^{13} \text{ см}^{-2}$ . ТПО загрязненных образцов проводилась в широком диапазоне температур как для режима накопления при  $V_g = +20 \text{ В}$ , так и в режиме восстановления при  $V_g = -1 \text{ В}$  ( $32 \dots 120 \text{ }^\circ\text{C}$ ). "Чистые" образцы исследовались в режиме накопления при  $V_g = +20 \text{ В}$  и  $\theta = 220 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Результаты расчетов при тех же энергетических параметрах ловушек у затвора ( $E_{b1} = 0.66 \text{ эВ}$ ;  $E_{bn} = 1.4 \text{ эВ}$ ;  $E_0 = 0.25 \text{ эВ}$ ) сравнивались с экспериментом [4] при  $120$  и  $220 \text{ }^\circ\text{C}$ . На рис. 2 представлены кинетики изменения относительного порогового напряжения в режиме накопления для чистого ( $\theta = 220 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $\tau = 2000 \text{ с}$ ;  $\Delta V_{th \max} = 5 \text{ В}$ ;  $Q_{M^+Me} = 2.2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ ) оксида (кривые 1, 1') и для загрязненного ( $\theta = 120 \text{ }^\circ\text{C}$ ;

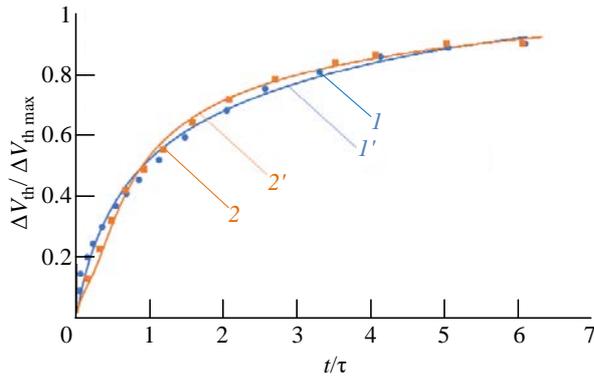


Рис. 2. Кинетики изменения относительного порогового напряжения в режиме накопления для чистого и загрязненного оксида для структур эксперимента [4]

Fig. 2. Kinetics of changes in relative threshold voltage in accumulation mode for pure and contaminated oxide for experimental structures [4]

$\tau = 40$  с;  $\Delta V_{th\ max} = 40$  В;  $Q_{M^+Me} = 1.67 \cdot 10^{13}$  см<sup>-2</sup>) оксида (кривые 2, 2'): экспериментальные [4] (кривые 1, 2) и рассчитанные при полиэнергетических ( $Q_{T\ Me} = 5.55 \cdot 10^{13}$  см<sup>-2</sup>) ловушках (кривые 1', 2').

Как видно из рис. 2, расчет при полиэнергетических ловушках (кривые 1', 2') достаточно хорошо описывает экспериментальные зависимости (кривые 1, 2).

Кинетика изменения порогового напряжения в режиме восстановления для структур эксперимента [13] при  $V_g = -1$  В (после положительного смещения при  $V_g = +2$  В,  $\theta = 120$  °С,  $t = 10$  мин) показана на рис. 3: кривая 1 – эксперимент [13], кривая 2 – расчет при тех же параметрах ловушек вблизи затвора, как и на рис. 1 без ловушек у кремния, кривая 3 – расчет при наличии полиэнергетических ловушек у кремния ( $E_{b1} = 0.87$  эВ;  $E_{bn} = 0.92$  эВ;  $E_0 = 0.25$  эВ;

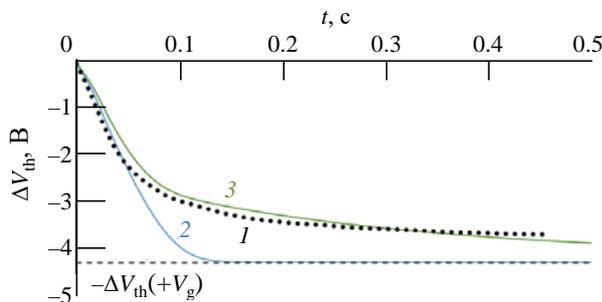


Рис. 3. Кинетика изменения порогового напряжения в режиме восстановления для структур эксперимента [13]

Fig. 3. Kinetics of changes in threshold voltage in recovery mode for experimental structures [13]

$$Q_{T\ Si} = 3.91 \cdot 10^{11}$$
 см<sup>-2</sup>).

Как видно из рис. 3, расчет соответствует экспериментальной зависимости (кривая 1) при наличии полиэнергетических ловушек не только у затвора (кривая 2), но и у кремния (кривая 3) и с меньшей дисперсией по энергии.

На рис. 4 показаны кинетики изменения относительного порогового напряжения в режиме восстановления при  $V_g = -1$  В (после положительного смещения до  $\Delta V_{th\ max} = 30$  В  $\approx Q_{M^+Si} = 7 \cdot 10^{12}$  см<sup>-2</sup>) для различных температур (32, 42, 80 и 120 °С,  $\tau = 110, 54, 2.1$  и  $0.22$  с соответственно): экспериментальные [4] (кривые 1–4) и расчетные (кривые 1'–4'). Расчет выполнен при таких же параметрах полиэнергетических ловушек у кремния, как и на рис. 3, кривая 3 ( $E_{b1} = 0.87$  эВ;  $E_{bn} = 0.92$  эВ;  $E_0 = 0.25$  эВ,  $Q_{T\ Si} = 2.68 \cdot 10^{12}$  см<sup>-2</sup>).

Как видно из рис. 4, расчет при наличии полиэнергетических ловушек у кремния (кривые 1'–4') с теми же параметрами, как на рис. 3, позволяет вполне удовлетворительно описать экспериментальные зависимости (кривые 1–4).

**Обсуждение и выводы.** Как видно из рис. 1 и 2, режим накопления подвижного заряда может быть описан посредством захвата ионов примеси не на моно-, а на полиэнергетические ловушки. Нижняя граница энергетического диапазона ловушек равна энергии активации подвижности  $E_a = E_{b1} = 0.66$  эВ, определенной

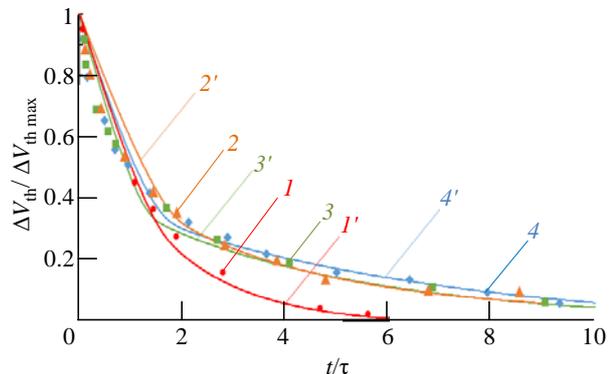


Рис. 4. Кинетики изменения относительного порогового напряжения в режиме восстановления при  $V_g = -1$  В для различных температур для структур эксперимента [4]

Fig. 4. Kinetics of changes in relative threshold voltage in recovery mode at  $V_g = -1$  V for different temperatures for experimental structures [4]

в [11]. Верхняя граница диапазона  $E_{bn} = 1.4$  эВ равна наибольшей энергии активации, зафиксированной экспериментально для диффузии ионов натрия в [14]. Отметим, что полученный энергетический диапазон хорошо соотносится с энергетическим диапазоном для ионных ловушек, полученным в [15] (0.75...1.5 эВ).

Кинетики накопления заряда в "загрязненных" и "чистых" образцах описываются при одинаковой концентрации ловушек вблизи МФГ SiO<sub>2</sub>-затвор ( $Q_{TMe} = 5.55 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ ), что соотносится с тем, что образцы были изготовлены в одинаковых условиях окисления. В обоих случаях расчетные концентрации загрязняющих ионов натрия оказались близкими к экспериментальным параметрам ( $Q_{N+Me} = 1.4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$  ( $\sim 10^{12} \text{ см}^{-2}$  в [13]) на рис. 1 и  $Q_{N+Me} = 1.67 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$  ( $\sim 10^{13} \text{ см}^{-2}$  в [4]) на рис. 3.

Режим восстановления происходит значительно быстрее, чем режим накопления (асимметричное поведение). На зависимостях рис. 3 и 4 можно видеть две области. Начальная область быстрого падения обусловлена дрейфом примеси от МФГ Si-SiO<sub>2</sub>, угол ее наклона характеризуется подвижностью свободной примеси. Последующая пологая область обусловлена захватом ионов примеси на ловушки вблизи затвора (см. рис. 3, кривая 2), а также на ловушки у границы с кремнием (см. рис. 3, кривая 3, рис. 4, кривые 1'-4'). Среди литературных данных для подвижности свободного натрия в термическом SiO<sub>2</sub> (приведены в [5]) только данные [11] соотносятся с модельными расчетами. Значение  $E_{b1} = 0.87$  эВ, полученное для ловушек вблизи МФГ Si-SiO<sub>2</sub>, достаточно хорошо соотносится с энергиями активации ионов Na<sup>+</sup>, определенными в [16, 17].

Асимметрия зависимостей на рис. 1–3 и 2–4 в рамках модели объясняется начальным расположением ионов Na<sup>+</sup> на ловушках вблизи затвора, а также различными параметрами полиэнергетических ловушек вблизи МФГ SiO<sub>2</sub>-затвор ( $E_{b1} = 0.66$  эВ;  $E_{bn} = 1.4$  эВ) и вблизи МФГ Si-SiO<sub>2</sub> ( $E_{b1} = 0.87$  эВ;  $E_{bn} = 0.92$  эВ).

Отметим, что в режимах накопления и восстановления заряда для полиэнергетических

ловушек получена одинаковая характеристическая энергия  $E_0 = 0.25$  эВ. Это свидетельствует об одинаковой природе ловушек захвата ионов примеси в подзатворном оксиде вблизи обеих МФГ: SiO<sub>2</sub>-затвор и SiO<sub>2</sub>-кремний.

Уменьшение диапазона энергий связи ионов Na с ловушками вблизи МФГ SiO<sub>2</sub>-Si (0.87...0.92 эВ) по сравнению с МФГ SiO<sub>2</sub>-затвор (0.66...1.4 эВ) можно связать с упорядочением аморфной структуры термического SiO<sub>2</sub> вблизи кремниевой подложки в слое с расчетной шириной экспоненциального распределения  $L = 2$  нм. Такая ширина соответствует толщине переходного слоя между стехиометрическим аморфным SiO<sub>2</sub>, полученным термическим окислением, и монокристаллической Si-подложкой. В переходном слое состав SiO<sub>x</sub> меняется от  $x = 2$  в SiO<sub>2</sub>, через  $x = 1.5$ , 1 и 0.5 до  $x = 0$  в Si [18]. По данным [19] переходный слой имеет повышенную плотность ( $\rho = 2.35...2.4 \text{ г/см}^3$ ) по сравнению с аморфным SiO<sub>2</sub> ( $\rho = 2.3 \text{ г/см}^3$ ), его толщина оценивается 0.5...2 нм [20–23]. В ранних работах указывалось на наличие в переходном слое кристаллической фазы β-кристобалита [24], α-кристобалита [25] или тридимита [26]. В более поздних работах [27–30] приводятся доказательства упорядоченного эпитаксиального роста похожего на кристаллитный (crystalite-like) оксида кремния в слое толщиной 2...3 нм. В [31] предложена, а в [32] подтверждена модель роста упорядоченной соединенной мостом интерфейсной (bridge-bonded interface) структуры без какой-либо кристаллической объемной фазы. Полученные авторами данные по уменьшению диапазона энергии связи подтверждают наличие тонкого слоя в оксиде вблизи МФГ с кремнием с более упорядоченной структурой, чем в оксиде у внешней МФГ вблизи затвора.

Таким образом, разработанная количественная модель, основанная на механизме многократного захвата подвижных ионов примеси полиэнергетическими ловушками в объеме аморфного подзатворного диэлектрика, позволяет описать асимметричное поведение МОП-структур при ТПО в режимах накопления и восстановления подвижного заряда.

### Список литературы

1. Bias temperature instability for devices and circuits / Ed. by T. Grassler. New York: Springer, 2013. 810 p.  
doi: 10.1007/978-1-4614-7909-3
2. Bias temperature instability of MOSFETs: physical processes, models and prediction / J. F. Zhang, R. Gao, M. Duan, Z. Ji, W. Zhang, J. Marsland // *Electronics*. 2022. Vol. 11, iss. 9. Art. № 1420.  
doi: 10.3390/electronics11091420
3. Ion transport phenomena in insulating films / E. H. Snow, A. S. Grove, V. E. Deal, C. T. Sah // *J. of Applied Physics*. 1965. Vol. 36, № 5. P. 1664–1673.  
doi: 10.1063/1.1703105
4. Hofstein S. R. An investigation of instability and charge motion in metal-silicon oxide-silicon structures // *IEEE Transactions on Electron Devices*. 1966. Vol. ED-13, iss. 2. P. 222–237.  
doi: 10.1109/T-ED.1966.15674
5. Александров О. В., Морозов Н. Н. Влияние ловушек на накопление подвижного заряда в МОП-структурах при термополевых обработках // *Изв. СПбГЭТУ "ЛЭТИ"*. 2023. Т. 16, № 6. С. 20–28.  
doi: 10.32603/2071-8985-2023-16-6-20-28
6. Красников Г. Я., Зайцев Н. А. Система кремний–диоксид кремния субмикронных СБИС. М.: Техносфера, 2003. 383 с.
7. Scher H., Montroll E. W. Anomalous transit-time dispersion in amorphous solids // *Physical Review B*. 1975. Vol. 12, № 6. Art. № 2455.  
doi: 10.1103/PhysRevB.12.2455
8. Curtis Jr O. L., Srour J. R. The multiple trapping model and hole transport in SiO<sub>2</sub> // *J. of Applied Physics*. 1977. Vol. 48, № 9. P. 3819–3828.  
doi: 10.1063/1.324248
9. Schmidlin F. W. Theory of multiple trapping // *Solid State Communications*. 1977. Vol. 22, iss. 7. P. 451–453.  
doi: 10.1016/0038-1098(77)90123-5
10. Noolandi J. Equivalence of multiple-trapping model and time-dependent random walk // *Physical Review B*. 1977. Vol. 16, № 10. Art. № 4474.  
doi: 10.1103/PhysRevB.16.4474
11. Архипов В. И., Никитенко В. Р. Дисперсионный транспорт в материалах с немонотонным энергетическим распределением локализованных состояний // *Физика и техника полупроводников*. 1989. Т. 23, № 6. С. 978–984.
12. Stagg J. P. Drift mobilities of Na<sup>+</sup> and K<sup>+</sup> ions in SiO<sub>2</sub> films // *Applied Physics Lett.* 1977. Vol. 31, № 8. P. 532–533.  
doi: 10.1063/1.89766
13. Krieglner R. J., Devenyi T. F. Temperature-bias aging of (HCl) MOS structures // 11<sup>th</sup> Reliability Physics Symp. Las Vegas, USA, 03–05 Apr. 1973. IEEE, 1973. P. 153–158.  
doi: 10.1109/IRPS.1973.362587
14. Ordered structure and ion migration in silicon dioxide films / T. Sugano, K. Hoh, K. Kudo, N. Hishinuma // *Japan. J. Appl. Phys.* 1968. Vol. 7, № 7. P. 715–730.  
doi: 10.1143/JJAP.7.715
15. Boudry M. R., Stagg J. P. The kinetic behavior of mobile ions in the Al–SiO<sub>2</sub>–Si system // *J. of Applied Physics*. 1979. Vol. 50, № 2. P. 942–950.  
doi: 10.1063/1.326016
16. Hickmott T. W. Thermally stimulated ionic conductivity of sodium in thermal SiO<sub>2</sub> // *J. of Applied Physics*. 1975. Vol. 46, № 6. P. 2583–2598.  
doi: 10.1063/1.321935
17. Гольдман Е. И., Ждан А. Г., Чучева Г. В. Транспорт свободных ионов в слое диэлектрика и эффекты электронно-ионного обмена у межфазной границы диэлектрик–полупроводник при термостимулированной ионной деполяризации кремниевых МОП-структур // *Физика и техника полупроводников*. 1999. Т. 33, № 8. С. 962–968.
18. Chemical structure of the ultrathin SiO<sub>2</sub>/Si(100) interface: An angle-resolved Si 2p photoemission study / J. H. Oh, H. W. Yeom, Y. Hagimoto, K. Ono, M. Oshima, N. Hirashita, M. Nywa, A. Toriumi, A. Kakizaki // *Physical Review B*. 2001. Vol. 63, № 20. Art. № 205310.  
doi: 10.1103/PhysRevB.63.205310
19. Structural fluctuation of SiO<sub>2</sub> network at the interface with Si / Y. Sugita, S. Watanabe, N. Awaji, S. Komiyu // *Applied Surface Science*. 1996. Vol. 100–101. P. 268–271.  
doi: 10.1016/0169-4332(96)00302-9
20. Стадии формирования границы раздела кремния с термическим окислом / В. В. Монахов, О. В. Романов, С. Н. Кириллов, В. Я. Урицкий, В. А. Смирнов // *Физика и техника полупроводников*. 1986. Т. 20, № 3. С. 477–480.
21. Infrared studies of transition layers at SiO<sub>2</sub>/Si interface / H. Ono, T. Ikarashi, K. Ando, T. Kitano // *J. of Applied Physics*. 1998. Vol. 84, № 11. P. 6064–6069.  
doi: 10.1063/1.368917
22. Kimura K., Nakajima K. Compositional transition layer in SiO<sub>2</sub>/Si interface observed by high-resolution RBS // *Applied surface science*. 2003. Vol. 216, № 1–4. P. 283–286.  
doi: 10.1016/S0169-4332(03)00386-6
23. Transition Structure at the Si (100)–SiO<sub>2</sub> Interface / A. Bongiorno, A. Pasquarello, M. S. Hybertsen, L. C. Feldman // *Physical Review Lett.* 2003. Vol. 90, № 18. Art. № 186101.  
doi: 10.1103/PhysRevLett.90.186101
24. Smith F. W., Ghidini G. Reaction of oxygen with Si (111) and (100): critical conditions for the growth of SiO<sub>2</sub> // *J. of the Electrochemical Society*. 1982. Vol. 129, № 6. Art. № 1300.  
doi: 10.1149/1.2124122
25. X-ray scattering studies of the Si–SiO<sub>2</sub> interface / P. H. Fuoss, Paul H. Fuoss, L. J. Norton, S. Brennan, A. Fischer-Colbrie // *Physical Review Lett.* 1988. Vol. 60, № 7. P. 600–603.  
doi: 10.1103/PhysRevLett.60.600

26. Ourmazd A., Taylor D. W., Rentschler J. A. Si→ SiO<sub>2</sub> transformation: interfacial structure and mechanism // *Physical Review Lett.* 1987. Vol. 59, № 2. Art. № 213.

doi: 10.1103/PhysRevLett.59.213

27. Observation of a Distributed Epitaxial Oxide in Thermally Grown SiO<sub>2</sub> on Si (001) / A. Munkholm, S. Brennan, F. Comin, L. Ortega // *Physical Review Lett.* 1995. Vol. 75, № 23. Art. № 4254.

doi: 10.1103/PhysRevLett.75.4254

28. X-ray diffraction evidence for the existence of epitaxial microcrystallites in thermally oxidized SiO<sub>2</sub> thin films on Si (111) surfaces / T. Shimura, H. Misaki, M. Umeno, I. Takahashi, J. Harada // *J. of Crystal Growth.* 1996. Vol. 166, № 1–4. P. 786–791.

doi: 10.1016/0022-0248(95)00496-3

29. In situ observation of epitaxial microcrystals in thermally grown SiO<sub>2</sub> on Si (100) / N. Awaji, Y. Sugita,

Y. Horii, I. Takahashi // *Applied Physics Lett.* 1999. Vol. 74, № 18. P. 2669–2671.

doi: 10.1063/1.123953

30. Ikarashi N., Watanabe K., Miyamoto Y. High-resolution transmission electron microscopy of an atomic structure at a Si (001) oxidation front // *Physical Review B.* 2000. Vol. 62, № 23. Art. № 15989.

doi: 10.1103/PhysRevB.62.15989

31. Tu Y., Tersoff J. Structure and energetics of the Si-SiO<sub>2</sub> interface // *Physical Review Lett.* 2000. Vol. 84, № 19. Art. № 4393.

doi: 10.1103/PhysRevLett.84.4393

32. Dreiner S., Schürmann M., Westphal C. Structural Analysis of the SiO<sub>2</sub>/Si (100) Interface by Means of Photoelectron Diffraction // *Physical Review Lett.* 2004. Vol. 93, № 12. Art. № 126101.

doi: 10.1103/PhysRevLett.93.126101

### Информация об авторах

**Александров Олег Викторович** – доктор физико-математических наук (2003), профессор (2008) кафедры электронного приборостроения Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 150 научных работ. Сфера научных интересов – диффузионное и ионное легирование полупроводников; сегрегация примесей на межфазных границах; физика МОП-структур.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: Aleksandr\_ov@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0008-1016-1031>

**Морозов Никита Николаевич** – магистр по направлению "Электроника и нанoeлектроника" (2022, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)), аспирант и ассистент кафедры электронного приборостроения Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор пяти научных публикаций. Сфера научных интересов – поведение МОП-структур при термополевых обработках; физика переноса подвижных ионов в аморфных диэлектриках.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: laughter-maiden@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0001-3655-4860>

### References

1. Bias Temperature Instability for Devices and Circuits. Ed. by T. Grassler. New York, Springer, 2013, 810 p. doi: 10.1007/978-1-4614-7909-3

2. Zhang J. F., Gao R., Duan M., Ji Z., Zhang W., Marsland J. Bias Temperature Instability of MOSFETs: Physical Processes, Models and Prediction. *Electronics.* 2022, vol. 11, iss. 9, art. no. 1420. doi: 10.3390/electronics11091420

3. Snow E. H., Grove A. S., Deal B. E., Sah C. T. Ion Transport Phenomena in Insulating Films. *J. of Applied Physics.* 1965, vol. 36, no. 5, pp. 1664–1673. doi: 10.1063/1.1703105

4. Hofstein S. R. An Investigation of Instability and Charge Motion in Metal-Silicon Oxide-Silicon Structures. *IEEE Transactions on Electron Devices.* 1966, vol. ED-13, iss. 2, pp. 222–237. doi: 10.1109/T-ED.1966.15674

5. Aleksandrov O. V., Morozov N. N. Influence of Traps on Mobile Charge Accumulation in MOS Structures in Thermal Field Treatments. *LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science.* 2023, vol. 16, no. 6, pp. 20–28. doi: 10.32603/2071-8985-2023-16-6-20-28

6. Krasnikov G. Ya., Zaitsev N. A. *Sistema kremniy-dioksid kremniya submikronnykh SBIS* [Silicon-Silicon Dioxide System of Submicron VLSI]. Moscow, *Tekhnosfera*, 2003, 383 p. (In Russ.)

7. Scher H., Montroll E. W. Anomalous Transit-Time Dispersion in Amorphous Solids. *Physical Review B.* 1975, vol. 12, no. 6, art. no. 2455. doi: 10.1103/PhysRevB.12.2455

8. Curtis Jr O. L., Srour J. R. The Multiple Trapping Model and Hole Transport in SiO<sub>2</sub>. *J. of Applied Physics.* 1977, vol. 48, no. 9, pp. 3819–3828. doi: 10.1063/1.324248

9. Schmidlin F. W. Theory of Multiple Trapping. *Solid State Communications*. 1977, vol. 22, iss. 7, pp. 451–453.  
doi: 10.1016/0038-1098(77)90123-5
10. Noolandi J. Equivalence of Multiple-Trapping Model and Time-Dependent Random Walk. *Physical Review B*. 1977, vol. 16, no. 10, art. no. 4474.  
doi: 10.1103/PhysRevB.16.4474
11. Arkhipov V. I., Nikitenko V. R. Dispersion Transport in Materials with Non-Monotonic Energy Distribution of Localized States. *Physics and Technology of Semiconductors*. 1989, vol. 23, no. 6, pp. 978–984. (In Russ.)
12. Stagg J. P. Drift Mobilities of Na<sup>+</sup> and K<sup>+</sup> Ions in SiO<sub>2</sub> Films. *Applied Physics Lett.* 1977, vol. 31, no. 8, pp. 532–533.  
doi: 10.1063/1.89766
13. Kriegler R. J., Devenyi T. F. Temperature-Bias Aging of (HCl) MOS Structures. 11<sup>th</sup> Reliability Physics Symp. Las Vegas, USA, 03–05 Apr. 1973. IEEE, 1973, pp. 153–158.  
doi: 10.1109/IRPS.1973.362587
14. Sugano T., Hoh K., Kudo K., Hishinuma N. Ordered Structure And Ion Migration In Silicon Dioxide Films. *Japan. J. Appl. Phys.* 1968, vol. 7, no. 7, pp. 715–730.  
doi: 10.1143/JJAP.7.715
15. Boudry M. R., Stagg J. P. The Kinetic Behavior of Mobile Ions in the Al–SiO<sub>2</sub>–Si System. *J. of Applied Physics*. 1979, vol. 50, no. 2, pp. 942–950.  
doi: 10.1063/1.326016
16. Hickmott T. W. Thermally Stimulated Ionic Conductivity of Sodium in Thermal SiO<sub>2</sub>. *J. of Applied Physics*. 1975, vol. 46, no. 6, pp. 2583–2598.  
doi: 10.1063/1.321935
17. Goldman E. I., Zhdan A. G., Chucheva G. V. Transport of Free Ions in a Dielectric Layer and Effects of Electron-Ion Exchange at the Dielectric-Semiconductor Interface during Thermally Stimulated Ion Depolarization of Silicon MOS Structures. *Physics and Technology of Semiconductors*. 1999, vol. 33, no. 8, pp. 962–968. (In Russ.)
18. Oh J. H., Yeom H. W., Hagimoto Y., Ono K., Oshima M., Hirashita N., Nywa M., Toriumi A., Kakizaki A. Chemical Structure of the Ultrathin SiO<sub>2</sub>/Si(100) Interface: An Angle-Resolved Si 2*p* Photoemission Study. *Physical Review B*. 2001, vol. 63, no. 20, art. no. 205310.  
doi: 10.1103/PhysRevB.63.205310
19. Sugita Y., Watanabe S., Awaji N., Komiya S. Structural Fluctuation of SiO<sub>2</sub> Network at the Interface with Si. *Applied Surface Science*. 1996, vol. 100–101, pp. 268–271.  
doi: 10.1016/0169-4332(96)00302-9
20. Monakhov V. V., Romanov O. V., Kirillov S. N., Uritskii V. Ya., Smirnov V. A. Stages of Formation of the Interface between Silicon and Thermal Oxide. *Physics and Technology of Semiconductors*. 1986, vol. 20, no. 3, pp. 477–480. (In Russ.)
21. Ono H., Ikarashi T., Ando K., Kitano T. Infrared Studies of Transition Layers at SiO<sub>2</sub>/Si Interface. *J. of Applied Physics*. 1998, vol. 84, no. 11, pp. 6064–6069.  
doi: 10.1063/1.368917
22. Kimura K., Nakajima K. Compositional Transition Layer in SiO<sub>2</sub>/Si Interface Observed by High-Resolution RBS. *Applied Surface Science*. 2003, vol. 216, no. 1–4, pp. 283–286.  
doi: 10.1016/S0169-4332(03)00386-6
23. Bongiorno A., Pasquarello A., Hybertsen M. S., Feldman L. C. Transition Structure at the Si (100)–SiO<sub>2</sub> Interface. *Physical Review Lett.* 2003, vol. 90, no. 18, art. no. 186101.  
doi: 10.1103/PhysRevLett.90.186101
24. Smith F. W., Ghidini G. Reaction of Oxygen with Si (111) and (100): Critical Conditions for the Growth of SiO<sub>2</sub>. *J. of the Electrochemical Society*. 1982, vol. 129, no. 6, art. no. 1300.  
doi: 10.1149/1.2124122
25. Fuoss P. H., Fuoss Paul H., Norton L. J., Brennan S., Fischer-Colbrie A. X-ray Scattering Studies of the Si–SiO<sub>2</sub> Interface. *Physical Review Lett.* 1988, vol. 60, no. 7, pp. 600–603.  
doi: 10.1103/PhysRevLett.60.600
26. Ourmazd A., Taylor D. W., Rentschler J. A. Si→SiO<sub>2</sub> Transformation: Interfacial Structure and Mechanism. *Physical Review Lett.* 1987, vol. 59, no. 2, art. no. 213.  
doi: 10.1103/PhysRevLett.59.213
27. Munkholm A., Brennan S., Comin F., Ortega L. Observation of a Distributed Epitaxial Oxide in Thermally Grown SiO<sub>2</sub> on Si (001). *Physical Review Lett.* 1995, vol. 75, no. 23, art. no. 4254.  
doi: 10.1103/PhysRevLett.75.4254
28. Shimura T., Misaki H., Umeno M., Takahashi I., Harada J. X-ray Diffraction Evidence for the Existence of Epitaxial Microcrystallites in Thermally Oxidized SiO<sub>2</sub> Thin Films on Si (111) Surfaces. *J. of Crystal Growth*. 1996, vol. 166, no. 1–4, pp. 786–791.  
doi: 10.1016/0022-0248(95)00496-3
29. Awaji N., Sugita Y., Horii Y., Takahashi I. In Situ Observation of Epitaxial Microcrystals in Thermally Grown SiO<sub>2</sub> on Si (100). *Applied Physics Lett.* 1999, vol. 74, no. 18, pp. 2669–2671.  
doi: 10.1063/1.123953
30. Ikarashi N., Watanabe K., Miyamoto Y. High-Resolution Transmission Electron Microscopy of an Atomic Structure at a Si (001) Oxidation Front. *Physical Review B*. 2000, vol. 62, no. 23, art. no. 15989.  
doi: 10.1103/PhysRevB.62.15989
31. Tu Y., Tersoff J. Structure and Energetics of the Si–SiO<sub>2</sub> Interface. *Physical Review Lett.* 2000, vol. 84, no. 19, art. no. 4393.  
doi: 10.1103/PhysRevLett.84.4393
32. Dreiner S., Schürmann M., Westphal C. Structural Analysis of the SiO<sub>2</sub>/Si (100) Interface by Means of Photoelectron Diffraction. *Physical Review Lett.* 2004, vol. 93, no. 12, art. no. 126101.  
doi: 10.1103/PhysRevLett.93.126101

### Information about the authors

**Oleg V. Aleksandrov**, Dr Sci. (Phys.-Math.) (2003), Professor (2008) of the Department of Electronic Instrumentation of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 150 scientific publications. Area of expertise: diffusion and ion doping of semiconductors; segregation of impurities at interphase boundaries; physics of MOS structures.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: Aleksandr\_ov@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0008-1016-1031>

**Nikita N. Morozov**, Master's degree in Electronics and Nanoelectronics (2022, Saint Petersburg Electrotechnical University), Postgraduate student and assistant of the Department of Electronic Instrumentation of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 5 scientific publications. Area of expertise: behavior of MOS structures during thermal field treatments; physics of transport of mobile ions in amorphous dielectrics.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: laughter-maiden@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0001-3655-4860>

---