

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК p-МОП ТРАНЗИСТОРОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ РЕНТГЕНОВСКОГО И ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ

В.Н. Ювченко<sup>1)</sup>, А.Ф. Комаров<sup>1)</sup>, Г.М. Заяц<sup>2)</sup>, С.А. Мискевич<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Институт прикладных физических проблем им. А.Н.Севченко БГУ,  
ул. Курчатова 7, 220045 Минск, Беларусь, komarAF@bsu.by

<sup>2)</sup>Институт математики НАН Беларуси,  
ул. Сурганова 11, 220072 Минск, Беларусь, zayats@im.bas-net.by

Проведено численное моделирование радиационно-индуцированного изменения порогового напряжения p-МОП-транзисторов с различной толщиной подзатворного диэлектрика с использованием модели пространственно-временной эволюции заряда, возникающего в подзатворном оксиде МОП-транзистора при воздействии рентгеновского и гамма-излучения. Представлены результаты моделирования сток-затворных и выходных ВАХ p-МОП-транзисторов с толщиной подзатворного диэлектрика 7 нм, облучаемых различными дозами гамма-квантов с энергией 1,2 МэВ.

**Ключевые слова:** моделирование; МОП-транзисторы; рентгеновское и гамма-излучение; пороговое напряжение; вольт-амперные характеристики.

## SIMULATION OF X-RAY AND GAMMA IRRADIATION IMPACT ON WORKING CHARACTERISTICS OF p-MOS TRANSISTORS

V.N. Yuvchenko<sup>1)</sup>, A.F. Komarov<sup>1)</sup>, G.M. Zayats<sup>2)</sup>, S.A. Miskiewicz<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Sevchenko Institute of Applied Physics Problems, Belarussian State University,  
7 Kurchatov Str., 220045 Minsk, Belarus, komarAF@bsu.by

<sup>2)</sup> Institute of mathematics, BAS, 11 Sarganov Str., 220072 Minsk, Belarus, zayats@im.bas-net.by

The model of space-time evolution of the charge appearing in the gate dielectric of the MOS transistor under X-ray and gamma irradiation is used to simulate transistor threshold voltage change under irradiation. The model includes two types of carrier traps – “deep” and “shallow”. Threshold voltage shifts for p-MOS transistors irradiated with 20 keV X-ray irradiation have been calculated. Transfer and output I-V characteristics of p-MOS transistors irradiated with 1.2 MeV gamma radiation were simulated for transistors with gate dielectric thickness of 7 nm. Main parameters of I-V characteristics and their changes under gamma irradiation with doses up to  $6 \times 10^6$  rad have been calculated.

**Keywords:** simulation; MOS-transistors; X-ray and gamma-irradiation; threshold voltage; current-voltage characteristics.

### Введение

Создание радиационноустойчивых интегральных схем, предназначенных для эксплуатации на борту космических аппаратов и на объектах атомной энергетики, является одной из актуальных задач микроэлектроники. Математическое моделирование изменений рабочих характеристик элементов интегральных схем при воздействии различных видов ионизирующих излучений позволяет сократить временные и материальные затраты на проведение долговременных натурных испытаний.

Радиационно-индуцированное изменение электрофизических характеристик МОП-структур связано в основном с образованием центров захвата и накоплением пространственного заряда в подзатворном диэлектрике, возрастанием плотности поверхностных состояний на границе раздела диэлектрик-полупроводник, а также уменьшением подвижности носителей заряда в приповерхностной области полупроводника.

### Основная часть

Для описания процессов накопления радиационно-индуцированного заряда в диэлектрике МОП-структур ( $\text{SiO}_2$ ) и последующей его релаксации использовалась модель, в соответствии с которой в запрещенной зоне  $\text{SiO}_2$  располагаются ловушечные уровни двух энергий – “мелкий”, расположенный вблизи потолка валентной зоны, и “глубокий”,

расположенный вблизи середины запрещенной зоны.

Ловушки, соответствующие “глубокому” уровню, представляют собой радиационно-индуцированные  $E'$ -центры, распределенные равномерно по объему диэлектрика. Ловушки, соответствующие “мелкому” уровню – индуцированные излучением  $P_b$ -центры – в переходных слоях толщиной несколько нанометров вблизи границ  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  и диэлектрик-поликремниевый затвор. В процессе воздействия радиации в диэлектрике происходит генерация электронно-дырочных пар, разделение этих пар внешним электрическим полем, уход более подвижных носителей – электронов из слоя  $\text{SiO}_2$  в электроды и захват дырок на ловушечные центры в диэлектрике. Кроме того, в результате воздействия ионизирующего излучения на границе раздела  $\text{Si}/\text{SiO}_2$  создаются дополнительные ловушки – поверхностные состояния. Релаксация накопленного в слое диэлектрика заряда происходит благодаря туннельному механизму разрядки.

Пространственно-временная эволюция заряда, возникающего в диэлектрике МОП-структуры при воздействии на нее ионизирующего излучения, в рамках данной модели описывается системой уравнений [1]

$$\frac{\partial n}{\partial t} = D_n \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} + \mu_n \frac{\partial (n \cdot E)}{\partial x} - n Q_1(E, P_{i1}, P_{i2}) + G(E), \quad (1)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = D_p \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \mu_p \frac{\partial(p \cdot E)}{\partial x} - p Q_2(E, P_{t1}, P_{t2}) + G(E), \quad (2)$$

$$\frac{\partial P_{t1}}{\partial t} = -P_{t1} S_1(p, n, E) + S_2(p, E) N_{t1}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial P_{t2}}{\partial t} = -P_{t2} S_1(p, n, E) + S_2(p, E) N_{t2}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial E}{\partial x} = \frac{q}{\varepsilon_{ox} \varepsilon_0} (P_{t1} + P_{t2} + p - n), \quad (5)$$

Туннельный механизм разрядки накопленного в диэлектрике заряда:

$$\frac{\partial P_t}{\partial t} = -P_t S_3(E). \quad (6)$$

Распределение потенциала в  $p$ -МОП транзисторе определяется уравнением электронейтральности

$$-V_G + \varphi_{ms} + \psi_s - \left( \frac{Q_{or}}{C_{ox}} + \frac{Q_{sc}(\psi_s)}{C_{ox}} + \frac{Q_{ss}(\psi_s)}{C_{ox}} \right) = 0. \quad (7)$$

Здесь  $n$ ,  $p$  – концентрации свободных электронов и дырок;  $E$  – напряженность электрического поля в диэлектрике;  $P_{t1,2}$  – концентрации дырочного заряда, захваченного на ловушках, соответственно «мелких» и «глубоких»;  $N_{t1,2}$  – концентрации ловушечных уровней;  $D_n$ ,  $D_p$  – коэффициенты диффузии,  $\mu_n$ ,  $\mu_p$  – подвижности электронов и дырок, соответственно;  $G$  – темп генерации излучением электронно-дырочных пар;  $V_G$  – напряжение на затворе МОП-транзистора;  $\varphi_{ms}$  – разность работ выхода материала затвора и полупроводника;  $\psi_s$  – поверхностный потенциал полупроводника,  $C_{ox}$  – емкость слоя диэлектрика,  $Q_{or}$  – эффективный заряд в диэлектрике, захваченный на ловушечных уровнях;  $Q_{cs}$  – заряд области пространственного заряда полупроводника;  $Q_{ss}$  – заряд на поверхностных состояниях:

Величины зарядов в объеме оксида и на поверхностных состояниях описываются соответственно выражениями

$$Q_{or} = \frac{1}{d} \int_0^d (d-x) \rho_i(x) dx \quad (8)$$

$$\text{и } Q_{ss} = q N_{ss} (\phi_0 - \psi_s), \quad (9)$$

где  $\rho_i(x)$  – распределение накопленного дырочного заряда на ловушечных уровнях,  $N_{ss} = k_D \frac{Q_{or}}{q\phi_0}$  –

усредненная по ширине запрещенной зоны полупроводника плотность поверхностных состояний ( $k_D$  – коэффициент образования поверхностных состояний, определяемый экспериментально). Напряжение  $V_G$  считаем пороговым, если достигается условие  $\psi_s = 2 \phi_0$ .

Начальные и граничные условия для системы уравнений (1-7), зависимости  $Q_1(E, P_{t1}, P_{t2})$ ,  $Q_2(E, P_{t1}, P_{t2})$ ,  $S_1(p, n, E)$ ,  $S_2(p, E)$ ,  $S_3(E)$ ,  $G(E)$ ,  $Q_{cs}(\psi_s)$  приведены в работе [2]. Распределение по толщине диэлектрика «мелких»  $N_{t1}$  и «глубоких»  $N_{t2}$  ловушечных уровней было взято из работы [1]. Для решения задачи использовались итерационный алгоритм и разностная схема, описанные в работе [2].

На рис. 1 представлено рассчитанное изменение порогового напряжения  $p$ -МОП транзистора в

процессе облучения рентгеновскими квантами с энергией 20 кэВ, для различных толщин подзатворного диэлектрика  $t_{ox}$ . При расчётах использовались следующие значения: мощность радиационной дозы  $dD/dt=10^2$  рад/с, концентрация легирующей примеси в кремнии  $N_B=10^{15}$  см<sup>-3</sup>, температура  $T=300$  К,  $V_G = -0,9$  В,  $\varphi_{ms} = -0,5$  В,  $\mu_n = 10^2$  см<sup>2</sup>В<sup>-1</sup>с<sup>-1</sup>,  $\mu_p = 0,6 \cdot 10^{-3}$  см<sup>2</sup>В<sup>-1</sup>с<sup>-1</sup>. Коэффициент генерации электронно-дырочных пар рентгеновским излучением в SiO<sub>2</sub>  $k_g = 8 \cdot 10^{12}$  см<sup>-3</sup>рад<sup>-1</sup> пар,  $k_D = 1,012$ .

Как видно из рисунка, рассчитанное пороговое напряжение  $p$ -МОП транзисторов с толщиной подзатворного оксида 25 – 75 нм слабо изменяется с ростом дозы облучения свыше  $2 \cdot 10^6$  рад. При этом в рассматриваемом диапазоне доз облучения изменение порогового напряжения достигает 2 В.

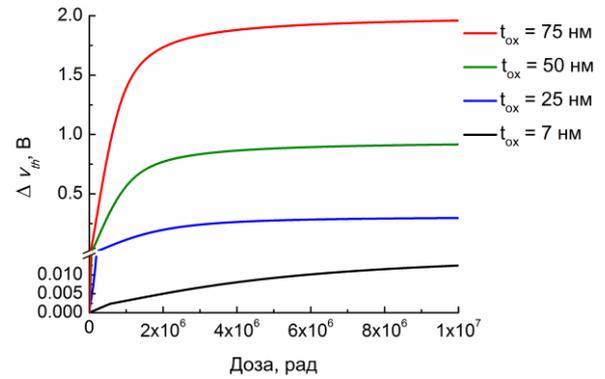


Рис. 1. Рассчитанная зависимость изменения порогового напряжения  $p$ -МОПТ от дозы облучения рентгеновскими квантами для различных толщин подзатворного диэлектрика

Fig. 1. Simulated radiation-induced change in the threshold voltage of  $p$ -MOS transistor for various X-ray doses and gate dielectric thicknesses

Результаты численных расчетов изменения порогового напряжения  $p$ -МОП транзисторов при облучении рентгеновскими квантами с энергией 20 кэВ для толщин подзатворного диэлектрика  $7 \text{ нм} < t_{ox} < 100 \text{ нм}$  и доз облучения  $D < 10^7$  рад с достаточной точностью аппроксимируются выражением

$$\Delta V_{th}(t_{ox}, D) = (t_{ox} / t_0)^3 \Delta V_{vol} (\exp(-D / D_{vol}) - 1) + (t_{ox} / t_0)^2 \Delta V_{int} (\exp(-D / D_{int}) - 1) \quad (10)$$

где  $\Delta V_{vol} = 1,9$  В и  $\Delta V_{int} = 2,1$  В – изменения порогового напряжения в насыщении, обусловленные объемными и интерфейсными эффектами, соответственно;  $D_{vol} = 6 \cdot 10^5$  рад и  $D_{int} = 1,7 \cdot 10^6$  рад – коэффициенты, определяющие скорости соответствующих процессов;  $t_0 = 100$  нм.

Для моделирования сток-затворных и выходных ВАХ  $p$ -МОП- транзисторов использовались экспериментальные результаты по облучению МОПТ классической геометрии с длиной и шириной канала 0,35 мкм и 10 мкм, соответственно, и толщиной подзатворного диэлектрика 7 нм, гамма-квантами <sup>60</sup>Со с энергией 1,2 МэВ и дозой до  $1 \cdot 10^7$  рад. Данные эксперименты проводились в НТЦ «Белмикросистемы» ОАО «Интеграл» [3].

На рис. 2 показаны экспериментальные и расчетные сток-затворные ВАХ  $p$ -МОПТ с толщи-

ной слоя диэлектрика 7 нм, облученных в активном электрическом режиме ( $V_G = -3,6$  В) гамма-квантами  $^{60}\text{Co}$  с энергией 1,2 МэВ.

Сток-затворные ВАХ в подпороговой области моделировались выражением [4]:

$$I_D(V_G) = I_L + I_{D0} \exp\left(\frac{V_G - V_T}{m\phi_T}\right), \quad (11)$$

где  $I_L$  – ток утечки,  $I_{D0}$  – ток стока при напряжении  $V_G$ , равном пороговому напряжению  $V_T$ ,  $\phi_T$  – температурный потенциал,  $m$  – фактор неидеальности. Использовались экспериментальные значения пороговых напряжений [3]. Токи утечки принимались равными  $-2,0 \times 10^{-11}$  А ÷  $-5,0 \times 10^{-11}$  А для доз облучения  $10^5$  рад ÷  $6 \times 10^6$  рад, что достаточно хорошо соответствует экспериментально определенным  $I_L$  [3].

Фактор неидеальности, равный  $m = 1,6$  для необлученных транзисторов, изменяется незначительно (до 1,7) с ростом дозы облучения до  $2 \times 10^6$  рад, и возрастает до 2,1 при дозе облучения  $6 \times 10^6$  рад.

В надпороговой области наилучшее соответствие с экспериментальными результатами дает использование квадратичной зависимости тока стока от эффективного напряжения на затворе в переходной области  $V_T < V_G < E_{SAT}L + V_T \approx -2,4 \div -2,6$  В:

$$I_{DSAT} = k_{ym} \frac{Z}{L} \mu_p C_{ox} \frac{(V_G - V_T)^2}{2n} \quad (12)$$

и линейной зависимости при больших  $V_G$  (приближение короткоканального транзистора) [4]:

$$I_{DSAT} = k_{ym} Z C_{ox} \left( V_G - V_T - \frac{n}{2} V_D \right) v_{SAT}, \quad (13)$$

$$n = 1 + \left\langle \frac{\partial V_T}{\partial V_{SB}} \right\rangle,$$

где  $Z$  – ширина канала,  $L$  – длина канала,  $C_{ox}$  – удельная емкость оксида,  $E_{SAT}$  – электрическое поле, соответствующее насыщению скорости носителей,  $v_{SAT}$  – предел дрейфовой скорости носителей в канале,  $V_{SB}$  – напряжение исток-подложка,  $n$  – коэффициент влияния подложки,  $k_{ym}$  – коэффициент, связанный с токами утечки.

Наилучшее соответствие с экспериментальными ВАХ для необлученных транзисторов получено при использовании значений  $n = 0,51$ ;  $k_{ym} = 0,27$ . При облучении гамма-квантами с энергией 1,2 МэВ происходит некоторый сдвиг и искажение ВАХ; при дозе облучения  $6 \times 10^6$  рад для моделирования использованы значения  $n = 0,76$ ;  $k_{ym} = 0,13$ . Последнее может быть связано с увеличением межприборных утечек в области края канавочной изоляции элементов микросхем, обусловленным продолжающимся накоплением положительного заряда в толстом полевом оксиде при увеличении дозы облучения [3].

Выходные ВАХ моделировались в крутой области как [4]:

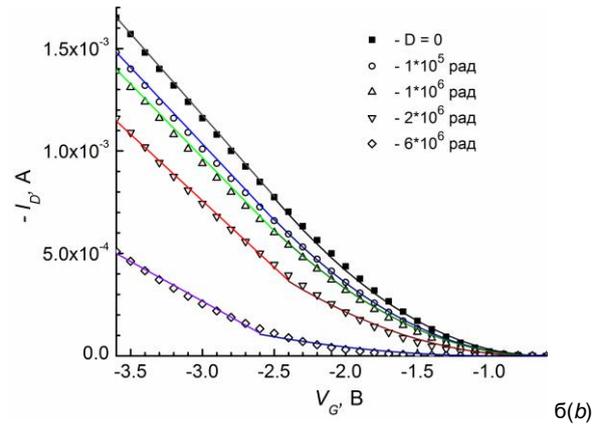
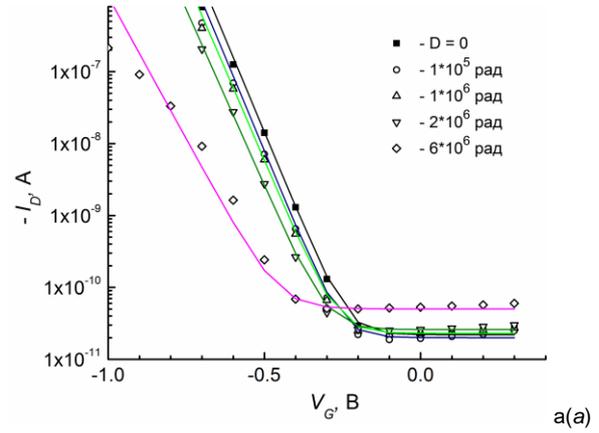


Рис. 2. Результаты моделирования влияния гамма-облучения на сток-затворные ВАХ  $p$ -МОП транзисторов: а - в подпороговой области; б - в области насыщения

Fig.2. Simulation results for gamma-irradiation impact on transfer I-V characteristics of  $p$ -MOS transistors: a – sub-threshold region; b – saturation region

$$I_D = k_{ym} \frac{Z}{L} \mu_p C_{ox} \left( V_G - V_T - \frac{n}{2} V_D \right) V_D, \quad (14)$$

В пологой области ВАХ как исходных, так и облученных транзисторов присутствует заметный рост тока стока с увеличением  $V_D$ , что можно приписать эффекту модуляции длины канала и в простейшем приближении описать линейной зависимостью [5]

$$I_D(V_G, V_D > V_{DSAT}) \cong \cong I_{DSAT}(V_G, V_{DSAT}) (1 + \lambda_m (V_D - V_{DSAT})) \quad (15)$$

где  $\lambda_m$  – константа модуляции длины канала.

На рис. 3 показаны экспериментальные и расчетные выходные ВАХ  $p$ -МОПТ с толщиной слоя диэлектрика 7 нм, облученных в активном электрическом режиме ( $V_G = -3,6$  В) гамма-квантами  $^{60}\text{Co}$  с энергией 1,2 МэВ.

Наилучшее соответствие с экспериментальными ВАХ получено при использовании значений  $n = 1,25$  как для необлученных транзисторов, так и для облученных гамма-квантами с дозой  $2 \times 10^6$  рад. При этом уменьшение крутизны ВАХ облученных транзисторов может объясняться как увеличением токов утечки, так и уменьшением подвижности дырок в приповерхностной области канала: отношение  $(k_{ym} \mu_p)_{обл} / (k_{ym} \mu_p)_{необл}$  составляет 0,57 для облу-

ченных в активном режиме и 0,76 для облученных в пассивном режиме  $p$ -МОПТ. Величина  $\lambda_m$  составляет для необлученных  $p$ -МОПТ  $0,048 \pm 0,031$  1/V для напряжений на затворе  $V_G = -3,6$  В  $\div$   $-1,5$  В, соответственно. После облучения в активном режиме  $\lambda_m$  увеличивается до 0,068 1/V при  $V_G = -3,6$  В. После облучения в пассивном режиме величина  $\lambda_m$  составляет 0,063 1/V при  $V_G = -3,6$  В. Таким образом, облучение гамма-квантами оказывает воздействие на эффект модуляции длины канала, что также связано с уменьшением подвижности носителей в приповерхностной области.

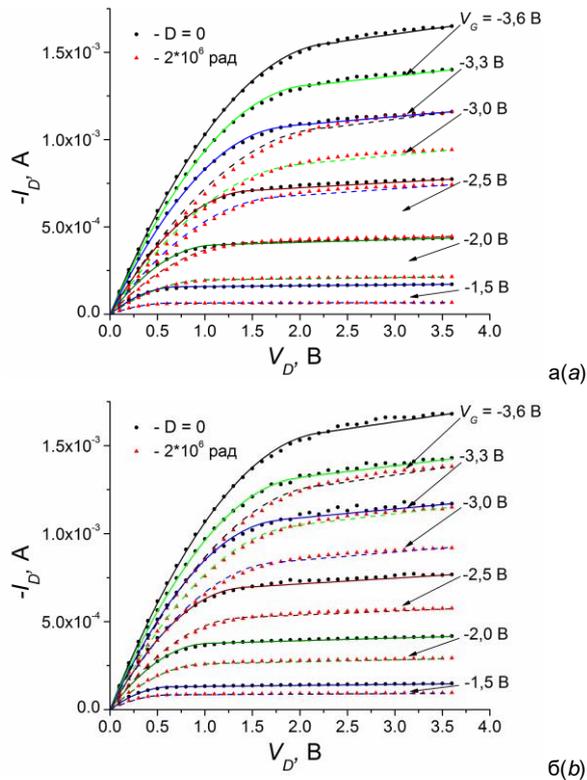


Рис. 3. Результаты моделирования влияния облучения гамма-квантами на выходные ВАХ  $p$ -МОПТ транзисторов: а – облучение в активном режиме ( $V_G = -3,6$  В); б – облучение в пассивном режиме ( $V_G = 0$ )

Fig. 3. Simulation results for gamma-irradiation impact on output I-V characteristics of  $p$ -MOS transistors: a – irradiation with  $-3,6$  V gate bias; b – irradiation without gate bias

### Заключение

Проведено моделирование изменения порогового напряжения МОП-структур и ВАХ  $p$ -МОП-транзисторов при облучении их рентгеновскими и

гамма-квантами различных доз. Уменьшение результирующего изменения порогового напряжения облученной МДП-структуры при уменьшении толщины подзатворного диэлектрика обуславливается изменением распределения захваченного заряда. При моделировании ВАХ учитывались эффекты короткого канала МОПТ: насыщение дрейфовой скорости носителей в канале и эффект модуляции длины канала. Рассчитаны коэффициенты, определяющие изменение вида ВАХ при облучении гамма-квантами с дозами до  $6 \times 10^6$  рад, в различных режимах работы прибора.

### Библиографические ссылки

1. Левин М.Н., Татаринцев А.В., Макаренко В.А., Гитлин В.Р. Моделирование процессов рентгеновской корректуры пороговых напряжений МДП-интегральных схем. *Микроэлектроника* 2006;35(5):382-391.
2. Komarov F.F., Zayats G.M., Komarov A.F., Miskiewicz S.A., Michailov V.V., Komsta H. Simulation of radiation effects in  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  structures. *Acta Physica Polonica A* 2015;128(5):857-860.
3. Коршунов Ф.П., Богатырев Ю.В., Белоус А.И., Шведов С.В., Малышев В.С., Ластовский С.Б. и др. Радиационные эффекты в элементах субмикронных КМОП интегральных схем. *Доклады БГУИР* 2011; 58(4): 43-48.
4. Парменов Ю.А. Элементы твердотельной нанoeлектроники. Москва: МИЭТ; 2011. 131 с.
5. Лазарь А.П., Коршунов Ф.П. Моделирование радиационной стойкости элементов логических КМОП интегральных микросхем. *Доклады БГУИР* 2013;75(5):17-23.

### References

1. Levin M.N., Tatarintsev A.V., Makarenko V.A., Gitlin V.R. Modelirovanie protsessov rentgenovskoy korrekturnoy porogovykh napryazheniy MDP-integral'nykh skhem [Simulation of X-ray correction of MOS-IC threshold voltages]. *Mikroelektronika* 2006; 35(5): 382-391 (In Russian).
2. Komarov F.F., Zayats G.M., Komarov A.F., Miskiewicz S.A., Michailov V.V., Komsta H. Simulation of radiation effects in  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  structures. *Acta Physica Polonica A* 2015; 128(5): 857-860.
3. Korshunov F.P., Bogatyrev Yu.V., Belous A.I., Shvedov S.V., Malyshev V.S., Lastovskiy S.B. et al. Radiatsionnye efekty v elementakh submikronnykh KMOP integral'nykh skhem [Radiation effects in elements of submicron CMOS integrated circuits]. *Doklady BGUIR* 2011; 58(4): 43-48. (In Russian).
4. Parmentov Yu.A. Elementy tverdotel'noy nanoelektroniki. [Elements of solid-state nanoelectronics]. Moscow: MIET; 2011. 131 p. (In Russian).
5. Lazar A.P., Korshunov F.P. Modelirovanie radiatsionnoy stoykosti elementov logicheskikh KMOP integral'nykh mikroskhem [Radiation resistance simulation of logical CMOS integrated circuits elements]. *Doklady BGUIR* 2013; 75(5): 17-23 (In Russian).