

Влияние низкоинтенсивного облучения на быстродействие КМОП микросхем

The effect of low-intensity radiation on the speed of CMOS microcircuits

Кузьмина А.В.¹, Попов В.Д.^{2*}
Kuzminova A.V.¹, Popov V.D.^{2*}

^{1,2}Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Российская Федерация, Москва, НИЯУ МИФИ

^{1,2}National Research Nuclear University (MEPhI), Russian Federation, Moscow

¹AVKuzminova@mephi.ru

^{2*}wdpopov@mail.ru



Кузьмина А.В.



Попов В.Д.

Резюме. Цель. Проведен анализ процессов деградации КМОП микросхем при воздействии ионизирующего излучения, в котором рассмотрены три процесса дефектообразования в МОП структуре на границе Si-SiO₂. **Методы.** На примере тестовых логических элементов проанализирована зависимость времени условного отказа по быстродействию от мощности дозы гамма-излучения. **Результаты.** Определен критический дефект на границе Si-SiO₂. **Заключение.** Предлагаемый в статье подход позволяет определить причины отказа КМОП микросхем. Представлен результат расчета времени отказа для трех значений мощности дозы.

Abstract. Aim. The degradation of CMOS microcircuits exposed to ionizing radiation was analysed. Three MOS defect formation processes at the Si-SiO₂ boundary were examined. **Methods.** Using the example of test logic elements, the dependence of the time of conditional speed failure on the gamma dose rate was analysed. **Findings.** A critical defect at the Si-SiO₂ boundary was identified. **Conclusions.** The approach proposed in the paper allows identifying the causes of CMOS microcircuit failures. Calculated failure times for three dose rates are presented.

Ключевые слова: МОП транзистор, образование поверхностных дефектов, ионизирующее излучение, время переключения логического элемента, прогнозирование отказов, быстродействие логического элемента

Keywords: MOS transistor, formation of surface defects, ionising radiation, gate time, failure prediction, gate speed.

Для цитирования: Кузьмина А.В., Попов В.Д. Влияние низкоинтенсивного облучения на быстродействие КМОП микросхем // Надежность. 2024. №3. С. 61-66. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2024-24-3-61-66>

For citation: Kuzminova A.V., Popov V.D. The effect of low-intensity radiation on the speed of CMOS microcircuits. Dependability 2024;3:61-66. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2024-24-3-61-66>

Поступила: 07.05.2024 / **После доработки:** 15.05.2024 / **К печати:** 09.09.2024

Received on: 07.05.2024 / **Revised on:** 15.05.2024 / **For printing:** 09.09.2024

Введение

В данной работе рассматриваются кремниевые микросхемы с МОП транзисторами (МОПТ). Эти микросхемы широко применяются в космической технике, в которой они подвергаются воздействию ионизирующего излучения (ИИ) космического пространства. При воздействии ИИ в МОПТ происходит образование дефектов и их заряда. При этом различают дефекты в объеме оксидной пленки (объемные дефекты), на границе раздела с кремнием (поверхностные состояния) и в приповерхностной области кремния (приповерхностные дефекты). Все эти дефекты изменяют характеристики МОПТ, что в дальнейшем приводит к отказам.

Объемные дефекты оксидной пленки заряжаются при облучении. Накопленный заряд Q_{oi} со временем насыщается. Он изменяет пороговое напряжение МОПТ $U_{пор}$. Однако при длительном низкоинтенсивном воздействии ИИ наблюдается уменьшение этого заряда [1] вследствие эмиссии электронов из полупроводника или поликремниевого затвора, которое показано на рис. 1. Поэтому основной вклад в ухудшение работоспособности МОПТ при низкоинтенсивном облучении ИИ является изменение плотности поверхностных дефектов.

Поверхностные дефекты являются следствием проявления оборванных валентных связей N_{SB} в приповерхностной области кремния [2] и на границе раз-

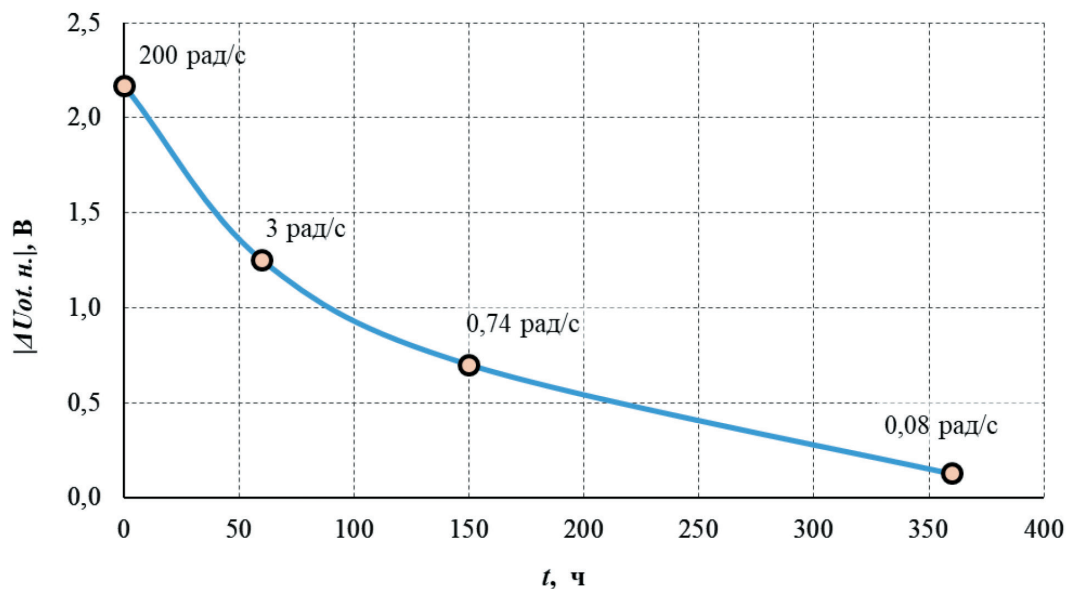


Рис. 1. Изменение насыщенного накопленного заряда $Q_{от}$ во время облучения при разных мощностях дозы ИИ

дела $Si-SiO_2$ (поверхностные центры P_{b0} и P_{b1}) [3]. Все эти поверхностные дефекты дают основной вклад в изменение параметров МОПТ, что приводит уменьшению быстродействия логических элементов. Однако все эти поверхностные дефекты при воздействии ИИ дают вклад в изменение параметров МОПТ в разное время [4].

При этом ухудшается крутизна вольт-амперной характеристики (ВАХ) МОПТ, что приводит к уменьшению быстродействия логических элементов.

Целью данной работы является уточнение причины снижения быстродействия логического элемента в КМОП интегральных микросхемах (ИМС) в разных условиях низкоинтенсивного облучения ИИ.

1. Описание эксперимента

В экспериментальном исследовании использовались КМОП логические элементы (ЛЭ) 2И-НЕ и проводилось измерение стоко-затворных ВАХ с помощью анализатора полупроводниковых приборов Agilent Technologies B1500A.

Измерения осуществлялись до и после каждого этапа эксперимента при проведении измерений. На выводе питания поддерживалось напряжение 5 В, а на затвор подавалось напряжение в диапазоне от 0 до 5 В с шагом в 100 мВ. Когда измерялась ВАХ одного ЛЭ, то входы остальных двух ЛЭ были заземлены. Схема измерений представлена на рис. 2.

Облучение проводилось гамма-излучением от источника Cs^{137} при мощности дозы $P = 0,1$ рад/с в электрическом режиме при напряжении питания $U_d = 5$ В. Мощность дозы контролировалась прибором типа ДКС-101. Результаты измерения ВАХ при разных дозах гамма-излучения представлены на рис. 3, где приведены ВАХ МОПТ с n -каналом (левая часть графика) и с p -каналом (правая часть графика) при разных до-

зах. Поскольку наибольшие изменения наблюдались у p -канальных МОПТ, то дальнейшие расчеты производились для данных элементов.

Результаты измерений ВАХ позволили определить такие важные параметры МОПТ, как пороговое напряжение U_{op} и приведенная крутизна k_{op} . Крутизна МОПТ определяется поверхностной подвижностью носителей заряда (дырок), размерами транзистора и емкостью затвора:

$$k_{op} = \mu_{sp} \frac{z}{L_k} C_{ox}, \quad (1)$$

где μ_{sp} – поверхностная подвижность дырок; z – ширина канала транзистора; L_k – его длина; C_{ox} – удельная емкость подзатворного оксида.

При воздействии гамма-излучения возникает сдвиг порогового напряжения МОПТ ΔU_{op} . Полученные па-

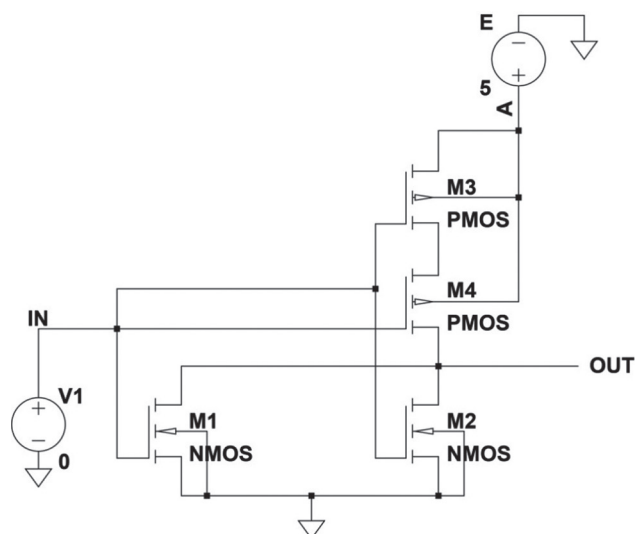


Рис. 2. Схема измерений параметров логического элемента 2И-НЕ

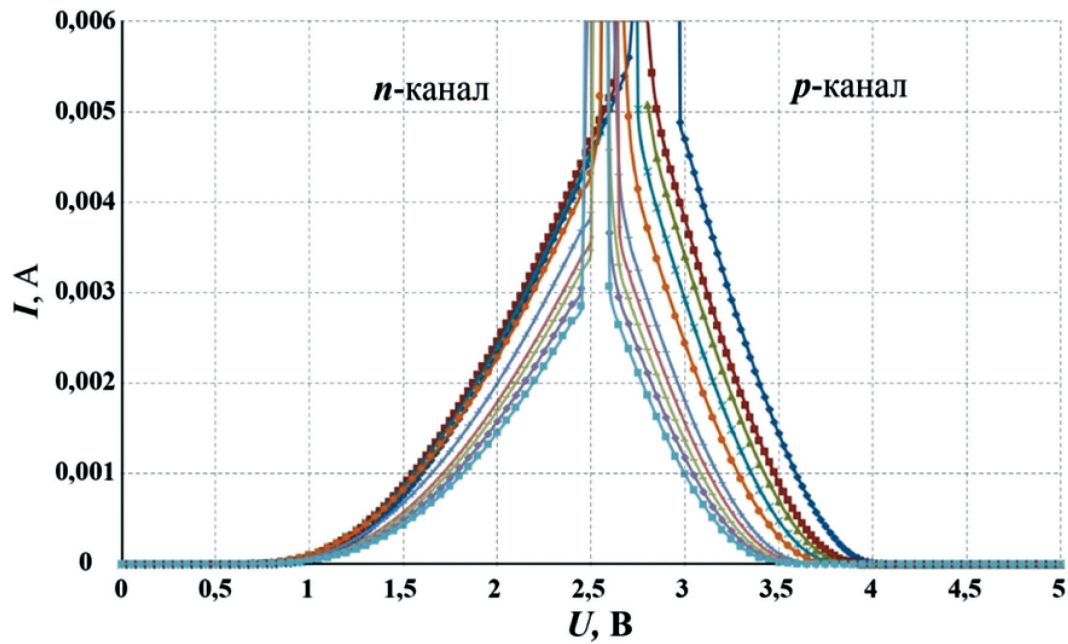


Рис. 3. Зависимость тока питания от напряжения на входах схемы И-НЕ в зависимости от времени облучения

раметры U_{0p} и μ_{sp} в зависимости от времени облучения приведены в табл. 1.

Табл. 1. Параметры моделей МОП-транзисторов в схемах 2И-НЕ

Время облучения, ч	Параметры p -канальных транзисторов	
	U_{0p} , В	μ_{sp} , $\text{см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$
0	-1,005	450
244	-1,153	435
583	-1,265	390
919	-1,351	370
1072	-1,386	350
1472	-1,477	300

Измерения параметров, характеризующие быстродействие, проводились для ЛЭ 2И-НЕ с использованием осциллографа типа DS03102A. Определены значения задержек при переключении ЛЭ. Результаты измерений представлены в табл. 2.

Табл. 2. Временные характеристики ЛЭ 2И-НЕ при емкости нагрузки 50 пФ

Время облучения, ч	t_3^{01} , нс	t_3^{10} , нс
0	5,55	8,72
244	6,45	8,74
583	7,59	8,76
919	8,68	8,82
1056	9,23	8,96
1472	11,01	9,51

Как можно видеть, наибольшая задержка наблюдалась при переключении из нуля в единицу, t_3^{01} . Задержка

переключения из единицы в ноль, t_3^{10} , практически не изменяется. Поэтому в данной работе принято за критическое значение задержки распространения сигнала $t_3^{01} = 10$ нс. Таким образом, при моделирующем испытании с мощностью дозы $P = 0,1$ рад/с получено время отказа $t_{от} = 1240$ ч.

2. Обработка результатов

Задержка переключения схемы 2И-НЕ может быть рассчитана по формуле [5]

$$t_{sp}^{01} = \frac{C_{\Sigma} - U_{num}}{k_{0p} (U_{num} - |U_{0p}|)^2}, \quad (2)$$

где C_{Σ} – суммарная емкость на выходе ЛЭ; U_{num} – напряжение питания ЛЭ; k_{0p} – приведенная крутизна; U_{0p} – пороговое напряжение p -канального МОПТ.

Используя значения приведенной крутизны k_{0p} , указанные в табл. 1, были определены относительные значения поверхностных подвижностей дырок как до $\mu_{sp}(0)$, так и после $\mu_{sp}(0)$ облучения гамма-лучами. Используя модель [6], были рассчитаны значения изменений плотности поверхностных дефектов (interface traps) ΔN_{it} :

$$\Delta N_{it} = \frac{\mu_{sp}(0) - \mu_{sp}(D)}{\alpha}, \quad (3)$$

где $\mu_{sp}(0)$ – поверхностная подвижность дырок в канале МОПТ при нулевой дозе; $\mu_{sp}(D)$ – поверхностная подвижность дырок в канале МОПТ при конкретном значении дозы D ; $\alpha = 7 \cdot 10^{-13} \text{ см}^2$ – эмпирическая константа.

Используя формулу (3), было получено изменение плотности поверхностных дефектов в p -канальных

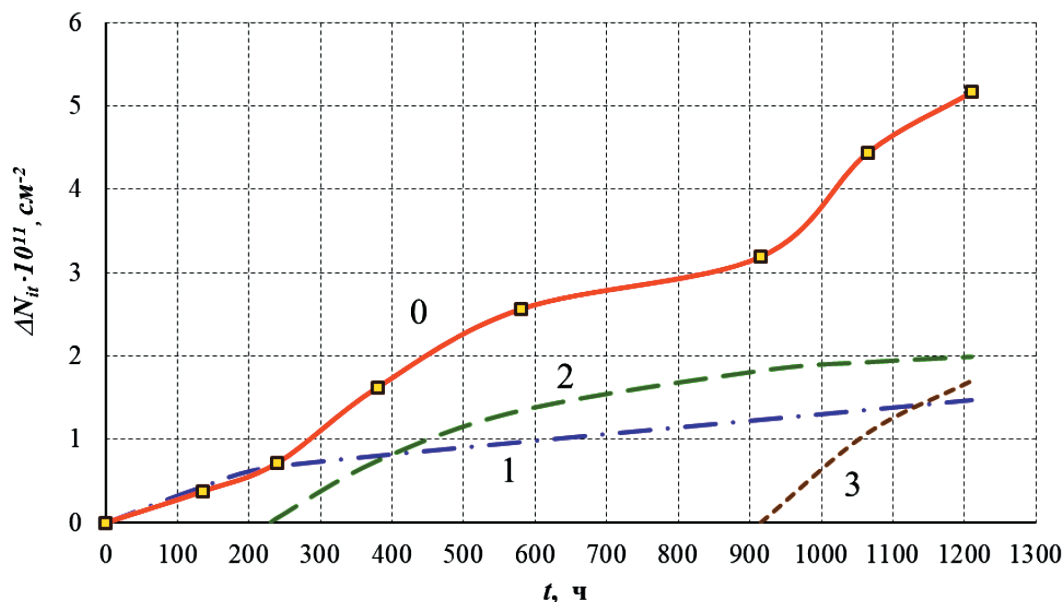


Рис. 4. Изменение плотности поверхностных дефектов ΔN_{it} в зависимости от времени облучения для p -канальных МОПТ схемы 2И-НЕ (0 – суммарная зависимость, 1, 2, 3 – зависимости на процессы дефектообразования)

МОПТ в зависимости от процессов дефектообразования, которые представлены на рис. 4.

Как можно видеть на рис. 4, дефектообразование происходит в несколько процессов дефектообразования. Анализ показывает, что функции изменения плотности поверхностных дефектов ΔN_{it} от времени облучения t представляют собой немономонную зависимость. Поэтому дальнейший анализ экспериментальных данных проводился с использованием программы *OriginLab*. Получено, что процесс поверхностного дефектообразования $\Delta N_{it}(t)$ разбивается на три экспоненциальные зависимости (кривые 1, 2, 3 на рис. 4) вида:

$$\Delta N_{it}(t) = \Delta N_{it,s} (1 - \exp(-b \cdot t)), \quad (4)$$

где $\Delta N_{it,s}$ – максимальная плотность поверхностных дефектов; b – скорость изменения плотности дефектов; t – время начала процесса дефектообразования.

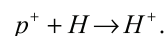
Эти зависимости отражают различные процессы поверхностного дефектообразования на границе раздела $Si-SiO_2$ и их параметры, которые представлены в табл. 3. Там же показаны и результаты статистической обработки данных.

Табл. 3. Параметры экспоненциальных зависимостей

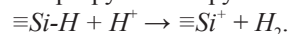
Процесс	$\Delta N_{it,s} \cdot 10^{11}, \text{см}^{-2}$	$b \cdot 10^{-3}, \text{ч}^{-1}$	R^2	$t, \text{ч}$	Вид дефекта
1	$1,558 \pm 0,061$	$2,38 \pm 0,25$	0,9945	0	ΔN_{SB}
2	$2,115 \pm 0,108$	$2,89 \pm 0,31$	0,9973	230	ΔN_{Pb0}
3	2,657	0,35	1	915	ΔN_{Pb1}

При воздействии гамма-излучения в начале облучения происходит разрыв напряженных валентных

связей между атомами кремния в приповерхностной области кремния, что вызывает рост дефектов ΔN_{SB} . В это время в объеме подзатворного диэлектрика протекает процесс образования дырок и их захват атомами водорода



Образовавшийся протон H^+ передвигается к границе $Si-SiO_2$ и вызывает разрушение группы $\equiv Si-H$ [7]



В итоге создаются поверхностные дефекты: P_{b0} -центр, а затем и P_{b1} -центр (см. табл. 3).

3. Прогнозирование отказов в реальных условиях

Процессы дефектообразования происходят во времени t и при воздействии дестабилизирующих факторов – мощности ионизирующего излучения P и температуры T . Обычно эти процессы характеризуются дозой $D = P \cdot t$. Однако такой подход не отражает изменение процессов во времени. Поэтому в данной работе предложено проведение прогнозирования отказа во времени (при условиях комнатной температуры). Для этого можно использовать формулу (4) и параметры экспоненциальных зависимостей из табл. 3 для различных процессов дефектообразования, в которых надо использовать значение реальной мощности дозы

$$b = b_0 \cdot P, \quad (5)$$

где b_0 – параметр экспоненты без воздействия ионизирующего излучения; P – мощность дозы излучения.

Использование модели поверхностного дефектообразования (4) позволило прогнозировать время отказа как в случае ускоренных испытаний при $P = 1,0$ рад/с,

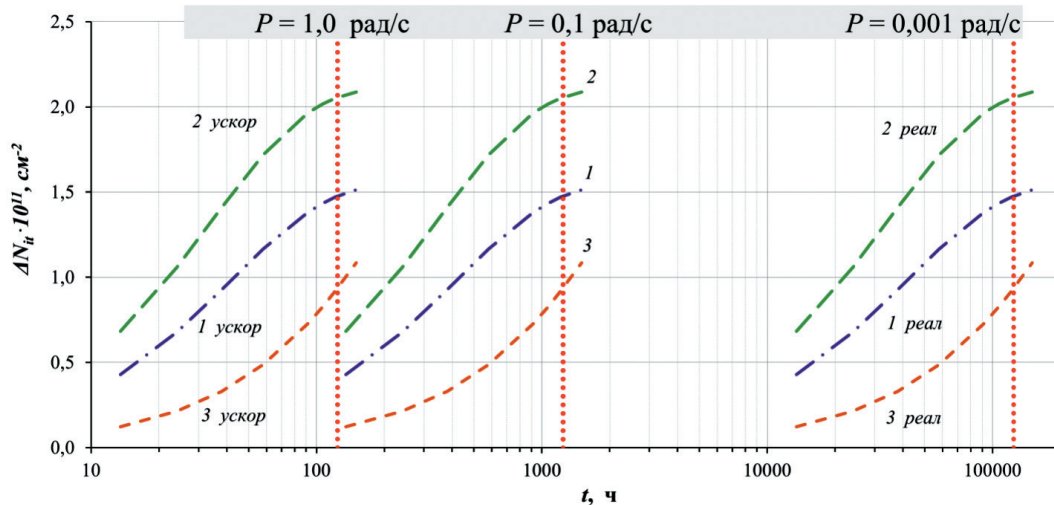


Рис. 5. Изменение плотности поверхностных дефектов от времени при различных дозах облучения и времена отказов для всех испытаний (..... – границы времен отказа)

так и в случае применения КМОП ИМС в космическом пространстве ($P = 0,001$ рад/с). Полученные зависимости представлены на рис. 5. Выявлены времена отказа (Failure) по быстродействию КМОП микросхем: $t_F = 124$ ч при $P = 1,0$ рад/с; $t_F = 1240$ ч при $P = 0,1$ рад/с; $t_F = 124000$ ч при $P = 0,001$ рад/с.

Рассчитан вклад каждого дефекта, проявляющегося на каждом процессе дефектообразования, считая суммарное изменение плотности дефектов за 100%, которого представлены в табл. 4.

Табл. 4. Доли дефектообразования при процессах

Вид дефекта	Процесс дефектообразования	Доля каждого вида дефекта, %
ΔN_{SB}	1	33
ΔN_{Pb0}	2	46
ΔN_{Pb1}	3	21

Как можно видеть, главной причиной отказа при различных видах испытаний является процесс образования дефектов типа P_{b0} -центр.

Рассчитаны величины задержки распространения сигнала t_{sp}^{01} для трех значений мощности дозы, характерные при ускоренных испытаниях ($P = 1,0$ рад/с); при моделирующих испытаниях ($P = 0,1$ рад/с) и при реальных условиях эксплуатации МОПТ в космическом пространстве ($P = 0,001$ рад/с) [7]. В случае применения КМОП ИМС в космическом пространстве при мощности дозы $P = 0,001$ рад/с получается время отказа по быстродействию $t_F = 14$ лет.

Заключение

Результаты измерений и расчетов показали, что процесс деградации КМОП ИМС имеет три составляющие, которые проявляются последовательно один за другим. Сначала происходит процесс разрыва напряженных валентных связей в приповерхностной

области кремния. Эти напряженные связи возникают из-за различия коэффициентов термического расширения кремния и оксида кремния. Затем наступают периоды освобождения оборванных связей на границе раздела $Si-SiO_2$ от пассивирующих протонов H^+ . Таким образом, возникают центры P_{b0} и P_{b1} , которые проявляются через 230 часов и через 915 часов после начала облучения ИИ. Доминирующим процессом является процесс образования центра P_{b0} . Этот дефект является критическим и приводит к отказу по быстродействию КМОП ИМС. В данном случае отказ по быстродействию при мощности дозы $P = 0,001$ рад/с ожидается через $t_F = 5167$ дней.

Библиографический список

1. Чжо Ко Вин. Применение ионизирующего излучения для ускоренных испытаний МОП интегральных схем // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. 2012. Вып. 1 (228). С. 54-56.
2. Булушева М.А., Попов В.Д., Протопопов Г.А., Скородумова А.В. Физическая модель процесса старения МОП-структуры // Физика и техника полупроводников. 2010. Т. 44. Вып. 4. С. 527-532.
3. Schroder D.K., Babcock J.A. Negative bias temperature instability: Road to cross in deep submicron silicon semiconductor manufacturing // Journal of Applied Physics. 2003. V. 94. No 1. P. 1-22. DOI: 10.1063/1.1567461
4. Кузьмина А.В., Попов В.Д. Исследование поверхностного дефектообразования на границе $Si-SiO_2$ с использованием низкоинтенсивного гамма-облучения // Фламан науки. Научный журнал. 2023. № 10(10). С. 402-409. DOI: 10.37539/2949-1991.2023.10.10.017
5. Попов В.Д., Белова Г.Ф. Физические основы проектирования кремниевых интегральных микросхем в монолитном и гибридном исполнении. СПб.: Издательство «Лань», 2013. 208 с.

6. Sexton F.W., Schwank J.R. Correlation of radiation effects in transistors and integrated circuits // *IEEE Trans. on Nucl. Sci.* 1985. Vol. 32. No 6. Pp. 3975-3981.

7. Алексеев И.И. и др. Ионизирующие излучения космического пространства и их воздействие на бортовую аппаратуру космических аппаратов / Под ред. докт. техн. наук, проф. Г.Г. Райкунова. М.: Физматлит. 2013. 358 с.

References

1. Zho Ko Wing. [Use of ionising radiation for accelerated testing of integrated MOS circuits]. *Elektronnaya tekhnika, Seria 2. Poluprovodnikovyye pribory* 2012;1(228):54-56. (in Russ.)

2. Bulusheva M.A., Popov V.D., Protopopov G.A., Skorodumova A.V. [A physical model of the ageing process of a MOS structure]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov* 2010;44(4):527-532. (in Russ.)

3. Schroder D.K., Babcock J.A. Negative bias temperature instability: Road to cross in deep submicron silicon semiconductor manufacturing. *Journal of Applied Physics* 2003;94(1):1-22. DOI: 10.1063/1.1567461.

4. Kuzminova A.V., Popov V.D. [A research of surface defect formation at the Si-SiO₂ boundary using low-intensity gamma radiation]. *Flagman nauki. Nauchny zhurnal* 2023;10(10):402-409. DOI: 10.37539/2949-1991.2023.10.10.017. (in Russ.)

5. Popov V.D., Belova G.F. [Physical principles of designing monolithic and hybrid silicon integrated circuits]. St. Petersburg: Lan Publishing; 2013. (in Russ.)

6. Sexton F.W., Schwank J.R. Correlation of radiation effects in transistors and integrated circuits. *IEEE Trans. on Nucl. Sci.* 1985;32(6):3975-3981.

7. Alekseev I.I. et al. Raikunova G.G., Doctor of Engineering, Professor, editor. [Cosmic ionising radiation and its effect on the onboard equipment of spacecraft]. Moscow: Physical education; 2013. (in Russ.)

Сведения об авторах

Кузьминова Алла Владимировна, Kuzminova Alla Vladimirovna, 109125, г. Москва, Российская Фе-

дерация; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Российская Федерация, Москва, НИЯУ МИФИ к.т.н., доцент кафедры Компьютерные системы информационных технологий National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Russian Federation, Moscow, MEPhI AVKuzminova@mephi.ru

Попов Виктор Дмитриевич, Popov Viktor Dmitrievich, г. Москва, Российская Федерация; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Российская Федерация, Москва, НИЯУ МИФИ д.т.н., профессор, Отделение нанотехнологий в электронике, спинтронике и фотонике офиса образовательных программ, National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Russian Federation, Moscow, MEPhI wdpopov@mail.ru

About the authors

Alla V. Kuzminova, Moscow, 109125, Russian Federation; National Research Nuclear University MEPhI, Russian Federation, Moscow, Candidate of Engineering, Senior Lecturer, Department of Computer Systems of Information Technology, AVKuzminova@mephi.ru.

Viktor D. Popov, Moscow, Russian Federation; National Research Nuclear University MEPhI, Russian Federation, Moscow, Doctor of Engineering, Professor, Department of Nanotechnology in Electronics, Spintronics, and Photonics of the Educational Programs Office, wdpopov@mail.ru.

Вклад авторов в статью:

Кузьминова А.В. описала математически процессы проявления дефектов во времени.

Попов В.Д. выполнил разделение дефектов по времени при низкоинтенсивном облучении.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.