

Микро- и нанoeлектроника

УДК 54-77, 54-78, 538.935, 621.382.323

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2020-23-1-30-40>

## Сравнение отклика МОП-транзистора на воздействие рентгеновского и гамма-облучения

С. А. Мокрушина<sup>1,2</sup>, Н. М. Романов<sup>2,3</sup> ✉

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> АО "Светлана-Полупроводники", Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

✉ [nikromanov.90@gmail.com](mailto:nikromanov.90@gmail.com)

### Аннотация

**Введение.** Ионизирующие излучения (ИИ) обладают большой проникающей способностью. В настоящее время в литературе нет однозначного представления о полном радиационном отклике МОП-транзисторов на различные виды ИИ (гамма- и рентгеновское). Поэтому наибольший интерес представляет радиационная стойкость МОП интегральных микросхем к воздействию этих излучений.

**Цель работы.** Изучение отклика МОП-транзисторов на воздействие гамма- и рентгеновского облучения, а также изучение влияния на этот отклик приложенного во время рентгеновского облучения внешнего потенциала затвор–подложка.

**Материалы и методы.** Исследуемыми структурами являлись МОП-транзисторы с поликремниевым затвором при толщине оксида (диоксида кремния) 120 нм. Источником гамма-излучения выступали радионуклиды цезий-137, рентгеновского излучения – рентгеновская трубка с вольфрам-ренийевым катодом. Анализировалось изменение порогового напряжения *n*- и *p*-канальных транзисторов методом транзисторной пары.

**Результаты.** Гамма- и рентгеновское излучения приводят к одинаковым эффектам в исследуемых структурах. Приложение напряжения к МОП-структуре в процессе рентгеновского облучения оказывает сильное влияние на ее радиационный отклик. Максимальный радиационный отклик МОП-транзисторов наблюдался при больших положительных потенциалах затвор–подложка. Были введены коэффициенты пропорциональности, обеспечивающие совпадение начальных участков дозовых зависимостей для различных приложенных потенциалов затвор–подложка.

**Заключение.** Определены значения коэффициентов пропорциональности зависимостей изменения порогового напряжения МОП-транзистора от дозы ИИ. Установлено численное соответствие между влиянием гамма- и рентгеновского излучений при дозах до  $1.9 \cdot 10^4$  рад (коэффициент пропорциональности составил 38.5). Определены коэффициенты пропорциональности, позволяющие сопоставлять пассивный (без приложения потенциала) режим облучения гамма-квантами и активный (с приложением потенциала затвор–подложка) режим облучения рентгеновскими квантами. Полученные поправочные коэффициенты зависят от полярности приложенного потенциала затвор–подложка. Для отрицательного потенциала коэффициент пропорциональности составил 38.5. При приложении положительной полярности коэффициент не зависит от приложенного потенциала и составляет 120.

**Ключевые слова:** МОП-транзистор, подзатворный диэлектрик, гамма- и рентгеновское облучение, объемный и поверхностный заряды, активный и пассивный режимы облучения

**Для цитирования:** Мокрушина С. А., Романов Н. М. Сравнение отклика МОП-транзистора на воздействие рентгеновского и гамма-облучения // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2020. Т. 23, № 1. С. 30–40. doi: [10.32603/1993-8985-2020-23-1-30-40](https://doi.org/10.32603/1993-8985-2020-23-1-30-40)

---

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

Статья поступила в редакцию 23.10.2019; принята к публикации после рецензирования 09.12.2019; опубликована онлайн 28.02.2020

---



## Comparison of the MOSFET Response at Exposed of the X-Ray and Gamma Radiation

Svetlana A. Mokrushina<sup>1,2</sup>, Nikolay M. Romanov<sup>2,3</sup>✉

<sup>1</sup>Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

<sup>2</sup>JSC Svetlana–Semiconductors, St Petersburg, Russia

<sup>3</sup>Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St Petersburg, Russia

✉nikromanov.90@gmail.com

### Abstract

**Introduction.** Electromagnetic or ionizing radiation (IO) has great influence for radiation resistance of MOSFETs (metal–oxide–semiconductor field-effect transistors) and integrated circuits. Oxide, for the studied samples, is silicon dioxide, which acts as a dielectric in MOS structure.

Currently, in literature there is no unambiguous idea of complete radiation response of MOSFETs to various types of ionizing radiation.

**Aim.** To study radiation response of MOSFETs under influence of gamma and X-ray irradiation; to study effect of applied external potential of a gate substrate.

**Materials and methods.** A total dose effect of gamma and X-ray radiation on the threshold voltage of MOSFET with a polysilicon gate and a gate oxide thickness of 120 nm with an applied external potential (-3, -2, 0, 3, 5, 10) V was studied. For gamma irradiation radionuclides cesium-137 with an energy of gamma quanta of 662 keV were used. X-ray tube with tungsten-rhenium cathode operated in modes 40 keV and 90 mA was used as a source of X-ray radiation. Dose and time dependences of the change in the threshold voltage of *n*- and *p*-channel MOSFET were analyzed. It was performed that the influence of gamma and X-ray radiation led to the same effects in the studied structures. The maximum radiation response of MOSFETs was observed at high positive gate-substrate potentials. The approximation parameters associated with the concentration and capture cross sections of traps responsible for the formation of charges in the dielectric gate through irradiation were determined.

**Results.** Strong influence of gamma and X-ray radiation led to the same effects in the studied structures. The applied voltage to the MOS structure during X-ray irradiation had a strong effect on their radiation response. The maximum radiation response of MOSFET at high positive gate-substrate potentials was observed. Proportionality coefficients to ensure the coincidence of the initial sections of the dose dependences for various applied gate-substrate potentials during irradiation were introduced. The coefficients allowed one to compare active and passive modes of operation of the X-ray emitter. Correction factors depended on the polarity of the applied gate-substrate potential. For negative potential, the proportionality coefficient value was 38.5. For the case of positive polarity the coefficient did not depend on the applied potential and the value was 120.

**Conclusion.** The study allows one to determine the coefficients for dose dependences of threshold voltage changes. For the first time, to establish a numerical relations between the effects of various types of radiation sources at irradiation doses up to  $1.9 \cdot 10^4$  Rad and proportionality coefficients becomes possible. It allows one to take into account the influence of applied potentials during irradiation on the radiation response of MOS structures.

**Keywords:** MOSFET, gate insulator, gamma and X-ray irradiation, space and surface charge, active and passive irradiation

**For citation:** Mokrushina S. A., Romanov N. M. Comparison of the MOSFET Response at Exposed of the X-Ray and Gamma Radiation. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2020, vol. 23, no. 1, pp. 30–40. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-1-30-40

**Conflict of interest.** Authors declare no conflict of interest.

Submitted 23.10.2019; accepted 09.12.2019; published online 28.02.2020

**Введение.** Всестороннее развитие оборонной, космической и атомной промышленности подразумевает использование полупроводниковых интегральных схем (ИС) на основе МОП-транзисторов (МОПТ), которые должны сохранять свою работоспособность при воздействии различных видов облучения в течение длительного времени [1]. Наибольший интерес представляют различные виды ионизирующих излучений (ИИ), обладающие высокой проникающей способностью (гамма- и рентгеновское).

Гамма-излучение является следствием распада радиоактивных изотопов, а рентгеновское излучение возникает в результате бомбардировки катода высокоэнергетическими электронами при приложении высокого напряжения к рентгеновской трубке. Вследствие воздействия ИИ на МОПТ появляются кратковременные зарядовые эффекты в металле и полупроводнике, а также долговременные зарядовые эффекты в оксиде [2, 3].

При воздействии ИИ на подзатворный оксид образуются электронно-дырочные пары (ЭДП), которые впоследствии разделяются полем внутри оксида. Электроны за счет более высокой подвижности покидают оксид за времена порядка пикосекунд, а дырки в соответствии с прыжковым механизмом перемещаются к межфазной границе раздела оксида, где они захватываются на объемные ловушки, внося положительный заряд в оксид [1, 4]. Вследствие взаимодействия радиационно-индуцированных дырок с объемными ловушками высвобождается водород, который участвует в депассивации амфотерных поверхностных состояний [5, 6].

При приложении порогового напряжения поверхностные состояния заряжаются положительно для *p*-канальных транзисторов и отрицательно для *n*-канальных. Суммарный заряд оксида определяет полный радиационный отклик МОПТ, который выражается в сдвиге порогового напряжения вследствие воздействия ИИ [3].

В настоящее время в литературе существуют различные представления о радиационном отклике МОПТ при воздействии разных видов ИИ. В [7] сопоставлены радиационные отклики МОПТ при воздействии  $\gamma$ -излучения от источника  $^{137}\text{Cs}$  и рентгеновского излучения с энергией 10 кэВ. Авторами было показано, что при гамма-облучении структур доля ЭДП, избежавших начальной рекомбинации, и изменение параметров исследуемых структур после облучения больше, чем при рентгеновском облучении. Приведены формулы

расчета доли ЭДП, избежавших рекомбинации, в зависимости от напряженности электрического поля в оксиде. Формулы для гамма- и рентгеновского облучения имеют одинаковый вид и отличаются только коэффициентами. При этом радиационные отклики для исследованных видов ИИ близки при малых дозах. В [8] приведены результаты сравнения различных видов облучения и показано, что доля ЭДП, избежавших рекомбинации, максимальна для гамма-облучения по сравнению с другими рассмотренными видами облучения. Авторы работы приводят универсальные формулы, позволяющие рассчитать эту долю в зависимости от напряженности электрического поля для различных ионизационных потерь в подзатворном оксиде МОПТ. Результаты в [7, 8] идентичны. Однако в [9] приведены результаты эксперимента, противоречащие результатам, полученным в [7, 8]. Исследовался отклик порогового напряжения радиационных сенсоров, представляющих собой *p*-канальные МОПТ с увеличенной толщиной подзатворного оксида, при воздействии  $\gamma$ -квантов от источника  $^{137}\text{Cs}$  и квантов рентгеновского излучения с энергиями 90 и 140 кэВ при потенциале затвора +5 В и в отсутствие потенциала в процессе облучения. Показано, что максимальный радиационный отклик получается при облучении рентгеновскими квантами с энергией 90 кэВ. Отметим, что все приведенные литературные данные получены в исследованиях при малых дозах облучения.

В настоящее время в литературе нет однозначного мнения о радиационном отклике МОПТ при воздействии малых доз различных видов ИИ в присутствии приложенного потенциала затвор-подложка, поэтому данный вопрос требует дополнительного подробного рассмотрения.

Если отклики МОПТ на различные виды облучения в пределах исследуемого диапазона доз близки, то имеется возможность замены  $\gamma$ -излучения на рентгеновское при анализе радиационной стойкости МОПТ без внесения существенных погрешностей. Установки для обеспечения рентгеновского облучения имеют меньшую стоимость и габариты по сравнению с установками для  $\gamma$ -облучения. Также они не требуют особых мер по захоронению радиоактивных отходов и являются более безопасными в период эксплуатации. Кроме того, исследовательские рентгеновские установки позволяют подавать потенциалы во время облучения непосредственно на МОПТ на промежуточных этапах

производства (до процесса корпусирования ИС). Реализация же активного режима работы (с приложением потенциала затвор–подложка) на облучающих установках, содержащих радионуклидные вещества, проблематична, в то время как исследование подобных режимов работы МОП интегральных схем является необходимой частью прогнозирования их радиационного отклика, так как при эксплуатации в ионизирующей среде схемы находятся под воздействием управляющих потенциалов.

Также известно, что приложение положительного потенциала к затвору при облучении приводит к увеличению радиационного отклика МОПТ за счет улучшения разделения электронно-дырочных пар и уменьшения начальной рекомбинации [4].

**Цель работы.** Сравнение радиационного отклика МОПТ на гамма- и рентгеновское облучение и оценка влияния приложенного внешнего потенциала затвор–подложка на дозовые зависимости изменения порогового напряжения МОПТ-транзисторов.

**Материалы и методы.** Анализ радиационного отклика проводился на *n*- и *p*-канальных МОПТ с поликремниевым затвором, легированным фосфором, изготовленных по стандартной планарной кремниевой технологии, с подзатворным оксидом толщиной 120 нм.

Гамма-облучение МОПТ проводилось на установке ГОТ. Мощность дозы гамма-облучения составила 62.5 рад/с. Установка представляет собой замкнутый саркофаг с ячейкой загрузки револьверного типа и 86 радионуклидами Cs-137 внутри. Количество и геометрия расположения источников позволяют создать однородный поток гамма-квантов с энергией 662 кэВ. Облучение осуществляется в квазизамкнутом объеме.

Рентгеновское облучение МОПТ как в активном, так и в пассивном (без приложения потенциала затвор–подложка) режиме осуществлялось на исследовательском рентгеновском излучателе с трубкой с вольфрам-ренийевым катодом, работающей в режиме 40 кВ и 90 мкА. Установка содержит высоковольтный блок с рентгеновской трубкой, блок управления, соединительные кабели и шину заземления. Согласно паспортным данным она позволяет использовать рентгеновские трубки в режиме 45 кВ, 100 мкА. Установка была доукомплектована зондовой станцией и источником напряжения, что позволило подавать различные потенциалы на контактные площадки исследуемых МОПТ во время облучения (в активном режиме). Приложенные к затвору потенциалы варьировались от –3 до +10 В.

дуемых МОПТ во время облучения (в активном режиме). Приложенные к затвору потенциалы варьировались от –3 до +10 В.

**Определение коэффициента пропорциональности поглощенной дозы для различных видов ИИ.** Для сравнения радиационного отклика МОПТ при воздействии рентгеновского и гамма-облучения исследовались транзисторы, изготовленные в едином технологическом цикле на общей пластине кремния с диэлектрической изоляцией (КСДИ). Облучение проводилось в пассивном режиме. Анализировалось изменение порогового напряжения МОПТ. Зависимость этой величины аппроксимировалась в условиях модели, предусматривающей отсутствие генерации новых объемных и поверхностных дефектов. В рамках этой модели процесс захвата радиационно-индуцированных носителей заряда на один тип объемных или поверхностных ловушек описывается зависимостью концентрации заряженных ловушек  $N_t$  от дозы облучения  $D$  вида [8, 10–13]

$$N_t = N_{t0} [1 - \exp(-\beta D)],$$

где  $N_{t0}$  – концентрация объемных или поверхностных преддефектов в оксиде;  $\beta$  – коэффициент, пропорциональный сечению захвата ловушки.

Соответствующее изменение порогового напряжения определяется как

$$\Delta U_{th} = \Delta U_{th_{max}} [1 - \exp(-\beta D)],$$

где  $\Delta U_{th_{max}}$  – установившееся значение изменения порогового напряжения.

Кроме того, в [2, 14] указано, что за образование как объемного, так и поверхностного зарядов отвечает не менее двух типов ловушек с различными сечениями захвата и концентрациями. Основной вклад вносят ловушки ( $E'$ -центры ( $-\text{Si} \equiv \text{O}_3$ ) и  $P_b$ -центры ( $-\text{Si} \equiv \text{Si}_3$ )) в оксиде, пассивированные водородными и гидроксильными группами. Изменение составляющих порогового напряжения, связанных с образованием объемного и поверхностного зарядов в диэлектрике, можно описать суммой как минимум двух таких экспоненциальных компонентов.

Рассматриваемые *n*- и *p*-канальные МОПТ изготавливались в едином технологическом цикле и подвергались одинаковому радиационному воздействию. В результате в слой оксида обоих типов МОПТ вносился в среднем одинаковый радиаци-

онно-индуцированный заряд. С учетом знаков зарядов, образующихся в оксиде, изменение порогового напряжения можно разложить на составляющие, которые для указанных МОПТ дают систему [9]

$$\begin{cases} \Delta U_{th\,n} = \Delta U_{ot} - \Delta U_{it}; \\ \Delta U_{th\,p} = \Delta U_{ot} + \Delta U_{it}, \end{cases}$$

где  $\Delta U_{ot}$  – изменение составляющей порогового напряжения, связанной с накоплением объемного заряда;  $\Delta U_{it}$  – изменение составляющей порогового напряжения, связанной с зарядом поверхностных состояний.

Плотности радиационно-индуцированных зарядов в подзатворном оксиде и изменения поверхностной и объемной составляющих порогового напряжения МОПТ связаны между собой следующими соотношениями:

$$\Delta N_{it} = \Delta U_{it} C_{ox} / q; \quad \Delta N_{ot} = \Delta U_{ot} C_{ox} / q,$$

где  $C_{ox} = \varepsilon_{ox} \varepsilon_0 / d_{ox}$  – удельная емкость диэлектрика ( $\varepsilon_{ox}$  и  $\varepsilon_0$  – диэлектрические проницаемости оксида и вакуума соответственно;  $d_{ox}$  – толщина подзатворного оксида);  $q$  – элементарный заряд.

Разделение дозовых зависимостей для  $n$ - и  $p$ -канальных транзисторов на составляющие, связанные с объемным и поверхностным зарядами, проводилось методом транзисторной пары [15]. Зависимости (рис. 1) получены с учетом наличия в диэлектрике двух видов объемных и двух видов поверхностных ловушек [2, 14].

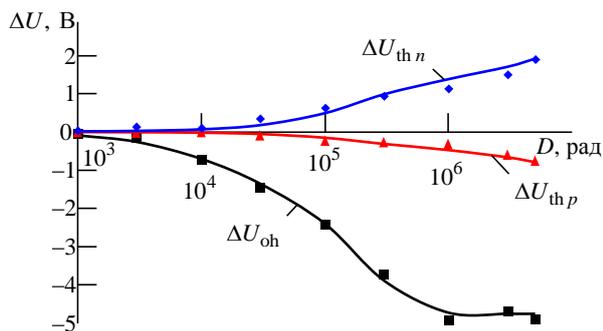


Рис. 1. Дозовые зависимости составляющих изменения порогового напряжения, связанных с объемным зарядом и зарядом поверхностных состояний, для  $n$ - и  $p$ -канальных МОПТ. Маркеры – результаты измерения, кривые – аппроксимация

Fig. 1. Dose dependences of components shift threshold voltage associated with space and surface charge for  $n$ - and  $p$ -channel MOSFETs.

Markers – measuring results, lines – approximation

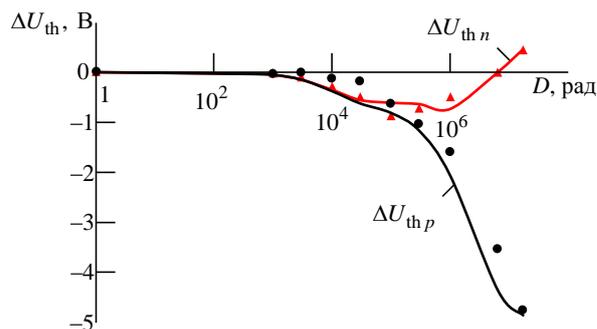


Рис. 2. Дозовые зависимости изменения порогового напряжения для  $n$ - и  $p$ -канальных МОПТ при гамма-облучении. Маркеры – результаты измерения, кривые – аппроксимация

Fig. 2. Dose dependences of shift threshold voltage for  $n$ - and  $p$ -channel MOSFETs under gamma irradiation. Markers – measuring results, lines – approximation

Параметры аппроксимации  
 Approximation parameters

Вид заряда	Параметр аппроксимации	
	Обозначение	Значение
Объемный	$U_{ot\,max1}$ , В	0.6
	$N_{ot1}$ , см <sup>-2</sup>	$1.0 \cdot 10^{11}$
	$U_{ot\,max2}$ , В	1.6
	$N_{ot2}$ , см <sup>-2</sup>	$2.7 \cdot 10^{11}$
	$\beta_1$ , рад <sup>-1</sup>	$9.0 \cdot 10^{-5}$
	$\beta_2$ , рад <sup>-1</sup>	$7.0 \cdot 10^{-7}$
Поверхностных состояний	$U_{it\,max1}$ , В	2.6
	$N_{it1}$ , см <sup>-2</sup>	$4.4 \cdot 10^{11}$
	$U_{it\,max2}$ , В	0.1
	$N_{it2}$ , см <sup>-2</sup>	$1.7 \cdot 10^{10}$
	$\beta_1$ , рад <sup>-1</sup>	$2.5 \cdot 10^{-7}$
	$\beta_2$ , рад <sup>-1</sup>	$5.0 \cdot 10^{-6}$

Полученные дозовые зависимости и их аппроксимация показаны на рис. 2. Параметры аппроксимации, использованные для анализа дозовых зависимостей, приведены в таблице. Коэффициенты  $\beta$  характеризуют технологию выращивания подзатворного оксида. Они пропорциональны сечению захвата различных ловушек в оксиде:  $\beta_{ot1}$ ,  $\beta_{ot2}$  – объемных ловушек двух типов;  $\beta_{it1}$ ,  $\beta_{it2}$  – поверхностных ловушек двух типов соответственно. Концентрации заряженных ловушек, внесенных облучением, указываются параметрами:  $N_{ot1}$ ,  $N_{ot2}$  – объемных ловушек двух типов;  $N_{it1}$ ,  $N_{it2}$  – поверхностных ловушек двух типов соответственно. Максимальное изменение напряжения, вносимое ловушками в оксиде, представлено величинами:  $U_{ot\,max1}$ ,  $U_{ot\,max2}$  – двумя типами

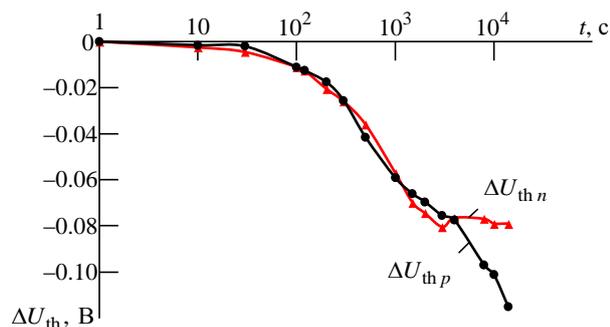


Рис. 3. Временные зависимости изменения порогового напряжения для  $n$ - и  $p$ -канальных МОПТ при рентгеновском облучении. Маркеры – результаты измерения

Fig. 3. Time dependences of shift threshold voltage for  $n$ - and  $p$ -channel MOSFETs under X-ray irradiation. Markers – measuring results

объемных ловушек;  $U_{it\ max1}$ ,  $U_{it\ max2}$  – двумя типами поверхностных ловушек соответственно.

Зависимости изменения порогового напряжения от времени воздействия рентгеновского излучения для  $n$ - и  $p$ -канальных МОПТ приведены на рис. 3.

Зависимости, представленные на рис. 2 и 3 для рентгеновского и гамма-облучения, имеют аналогичную форму, следовательно, ионизационный эффект, вызываемый в подзатворном диэлектрике МОПТ этими видами излучения, обусловлен одними и теми же физическими явлениями в оксиде, связанными с процессами захвата носителей на одни и те же ловушки. Одинаковая форма зависимостей изменения порогового напряжения позволяет ввести коэффициент пропорциональности поглощенной дозы гамма-излучения в диоксиде кремния и времени влияния рентгеновского облучения. Из экспериментальных кривых было определено значение этого коэффициента исследованных образцов, составившее 38.5.

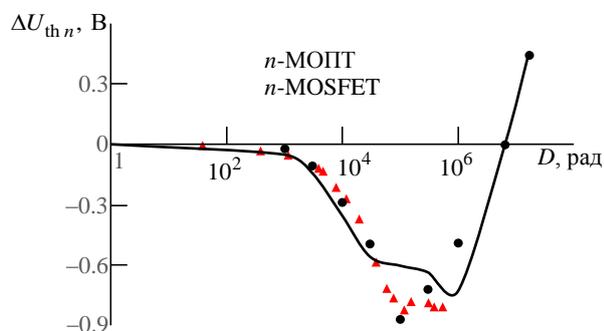


Рис. 4. Дозовые зависимости изменения порогового напряжения для  $n$ - и  $p$ -канальных МОПТ. Маркеры – результаты измерения: черные – для гамма-излучения, красные – для рентгеновского излучения. Кривые – аппроксимация для обоих типов излучения

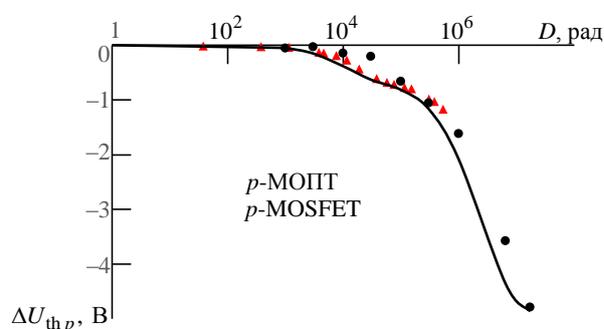
Fig. 4. Dose dependences of shift threshold voltage for  $n$ - and  $p$ -channel MOSFETs. Markers – measuring results: black – for gamma irradiation, red – for X-ray irradiation. Lines – approximation for both types of irradiation

Принятый абсолютный коэффициент позволяет обеспечить совпадения дозовых зависимостей и аппроксимирующей кривой, построенной по данным таблицы (рис. 4). Полученный результат дает возможность определить поглощенную дозу рентгеновского излучения для конкретного диэлектрика (диоксида кремния).

**Влияние приложенного потенциала.** Происходящие процессы в оксиде имеют вероятностный характер. Положительный потенциал приводит к смещению динамического равновесия в сторону процесса захвата носителей на ловушки вблизи границы раздела полупроводник–диэлектрик. Вероятность процесса захвата носителей возрастает за счет увеличения концентрации дырок в этой области [16]. Приложение отрицательного потенциала приводит к уменьшению установившегося значения  $\Delta U_{th}$ , что связано со смещением динамического равновесия вблизи границы оксид–подложка в сторону высвобождения носителей заряда из ловушек по сравнению со случаем отсутствия внешнего поля при облучении МОПТ.

Значение приложенного в процессе облучения положительного потенциала существенно влияет на дозовые зависимости изменения порогового напряжения. Это обусловлено влиянием напряженности как внутреннего (встроенного), так и внешнего электрического поля на разделение сгенерированных в процессе облучения электронно-дырочных пар в объеме диэлектрика, а также на изменение дрейфовой составляющей подвижности носителей заряда, движущихся через объем подзатворного оксида к ловушкам захвата, расположенным вблизи границы раздела.

Результаты исследования влияния приложенного потенциала затвор–подложка  $U_{gs}$  при рент-



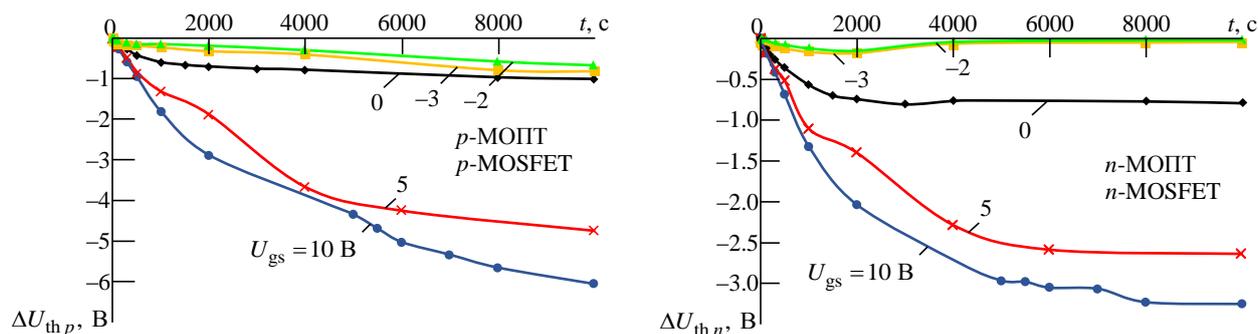


Рис. 5. Временные зависимости изменения порогового напряжения для  $n$ - и  $p$ -канальных МОПТ при приложении потенциала затвор–подложка в процессе облучения. Маркеры – результаты измерения

Fig. 5. Time dependences of shift threshold voltage for  $n$ - and  $p$ -channel MOSFETs upon application of the gate-substrate potential during irradiation. Markers – measuring results

геновском облучении для  $n$ - и  $p$ -канальных МОПТ представлены на рис. 5. Приложенный отрицательный потенциал практически не влияет на дозовые зависимости в пределах погрешности эксперимента. Приложение отрицательного потенциала, в отличие от положительного, приводит к изменению направления напряженности внешнего электрического поля, что вызывает изменение направления движения подвижных носителей заряда, сгенерированных в объеме подзатворного оксида в процессе облучения. В данном случае сгенерированные заряды удаляются от приповерхностной области границы раздела оксид–подложка. Таким образом, основной радиационно-индуцированный заряд формируется у границы затвор–подложка, где он практически не оказывает влияния на приповерхностный слой полупроводниковой подложки, и только дырки, сгенерированные непосредственно в приповерхностной области границы раздела полупроводник–диэлектрик, участвуют в образовании радиационно-индуцированных зарядов в диэлектрике.

Приложение положительного потенциала приводит к увеличению установившегося значе-

ния  $\Delta U_{th}$ . Установившееся значение, наблюдаемое на дозовой зависимости изменения порогового напряжения МОПТ, связано с состоянием динамического равновесия между захватом и высвобождением различных носителей заряда с ловушек в подзатворном оксиде [16]. Приложенный внешний потенциал, равный  $-2$  В, приводит к перекompенсации встроенного потенциала диэлектрика в МОПТ-структуре, обусловленного контактной разностью потенциалов затвор–подложка и встроенным зарядом в диэлектрик, возникнувшем в процессе термического окисления кремния. Дальнейшее увеличение отрицательного внешнего потенциала затвор–подложка не приводит к существенным изменениям дозовых зависимостей сдвига пороговых напряжений  $n$ - и  $p$ -канальных МОПТ.

Зависимости  $\Delta U_{th}$  от приложенного потенциала затвор–подложка  $U_{gs}$  для различных доз гамма-излучения (рис. 6) демонстрируют тенденцию к достижению установившихся значений. При малых дозах облучения (до  $1.9 \cdot 10^4$  рад) изменение порогового напряжения слабо зависит от

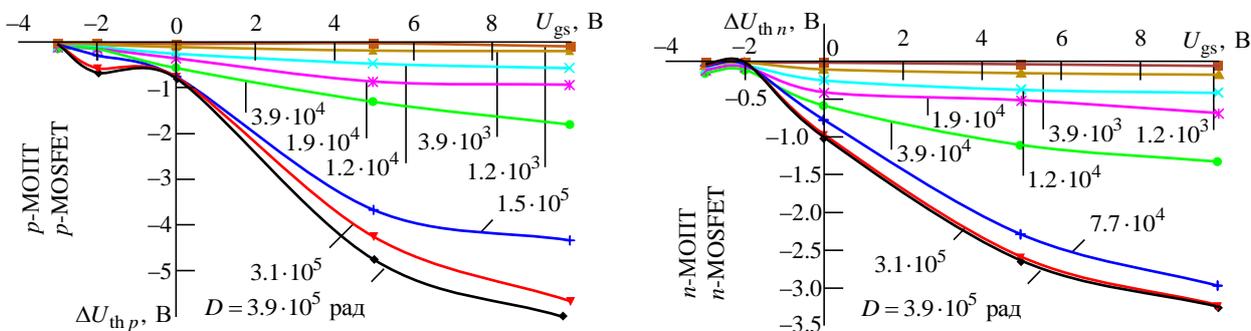


Рис. 6. Зависимости изменения порогового напряжения для  $n$ - и  $p$ -канальных МОПТ от потенциала затвор–подложка, приложенного в процессе облучения. Маркеры – результаты измерения

Fig. 6. Dependences of shift threshold voltage for  $n$ - and  $p$ -channel MOSFETs upon the gate-substrate potential application during irradiation. Markers – measuring results

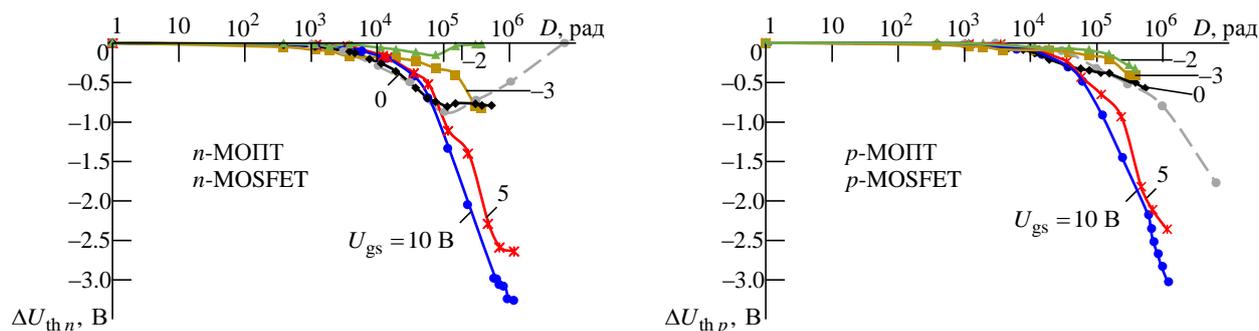


Рис. 7. Зависимости изменения порогового напряжения для  $n$ - и  $p$ -канальных МОПТ от потенциала затвор–подложка, приложенного в процессе облучения, скорректированные с учетом поправочного коэффициента пропорциональности. Сплошные кривые – рентгеновское облучение, штриховая кривая – гамма-облучение. Маркеры – результаты измерения

Fig. 7. Dependences of shift threshold voltage for  $n$ - and  $p$ -channel MOSFETs upon the gate–substrate potential application during irradiation, adjusted for the correction proportionality coefficient. Solid lines – X-ray irradiation, dashed line – gamma irradiation. Markers – measuring results

приложенного потенциала. При потенциалах более 5 В рассматриваемые зависимости достигают установившихся значений, причиной чего является ограниченное количество образовавшихся в процессе облучения дырок, способных участвовать в формировании объемного и поверхностного заряда вблизи границы раздела кремний–диоксид кремния.

При больших дозах облучения количество сгенерированных электронно–дырочных пар значительно увеличивается, и зависимость изменения порогового напряжения от напряжения на затворе, приложенного в процессе облучения имеет большую крутизну. Установившиеся значения не достигаются даже при потенциале на затворе, равном +10 В, что свидетельствует о том, что в исследованном диапазоне доз рентгеновского облучения количество имеющихся ловушек захвата заряда превышает количество сгенерированных в процессе облучения дырок, достигнувших приповерхностной области полупроводника.

При отрицательных потенциалах на затворе зависимость изменения порогового напряжения от потенциала затвора, приложенного в процессе облучения, будет слабой во всем исследуемом диапазоне доз (как указано ранее) за счет расположения объемного и поверхностного зарядов у внешней границы оксида, где этот заряд оказывает минимальное влияние на подзатворную приповерхностную область подложки исследуемых МОПТ.

**Влияние приложенного к затвору напряжения на коэффициент пропорциональности.** Анализ дозовых зависимостей изменения порогового напряжения при воздействии гамма- и рентгеновского излучений в пассивном, а также рентгеновского излучения в активном режиме при приложении по-

тенциалов затвор–подложка различных значений и полярностей показал, что при малых дозах облучения (менее  $1 \cdot 10^4$  рад) возможно ввести коэффициент пропорциональности, который позволит приравнять радиационные отклики МОПТ вследствие воздействия активного и пассивного режимов облучения.

Следует отметить, что полученный коэффициент пропорциональности между пассивными режимами гамма- и рентгеновского облучения, равный 38.5, совпадает с коэффициентом пропорциональности между пассивным режимом гамма-облучения и различными активными режимами рентгеновского облучения при отрицательном потенциале затвор–подложка.

Для активных режимов при положительной полярности коэффициент превышает указанное значение примерно в 3 раза и составляет 120. Как для отрицательной, так и для положительной полярности активного режима рентгеновского облучения коэффициент пропорциональности в рассматриваемом диапазоне напряжений затвор–подложка не зависит от потенциала.

Дозовые зависимости изменения порогового напряжения при приложении различных потенциалов к затвору в процессе рентгеновского и гамма-облучения с учетом поправочных коэффициентов пропорциональности приведены на рис. 7.

**Результаты исследования.** Подобность характера дозовых зависимостей для гамма- и рентгеновского облучения, что коррелирует с данными авторов работы [7], позволяет описать зависимости при помощи одной аппроксимирующей кривой, что свидетельствует об идентичности параметров процессов образования, переноса и захвата подвижных носителей заряда в подзатворном диэлектрике МОПТ для различных видов

ИО. Параметры аппроксимации зависят от технологии изготовления МОПТ и полностью определяются сечением захвата и концентрацией ловушек. Для исследованной технологии дозовые зависимости хорошо описываются с учетом двух типов ловушек, участвующих в образовании объемного заряда, и двух типов ловушек, участвующих в образовании амфотерных поверхностных состояний. Параметры аппроксимации представлены в таблице. Полученные значения параметра  $\beta$  несколько отличаются от рассчитанных по модели, представленной в [17]: для объемного заряда  $\beta = 6 \cdot 10^{-6} \text{ рад}^{-1}$ , для заряда поверхностных состояний  $\beta = 6 \cdot 10^{-7} \text{ рад}^{-1}$ , однако необходимо отметить, что авторы указанной работы в своей модели учитывали наличие только одного типа ловушек захвата как для объемного заряда, так и для заряда поверхностных состояний.

Исследование активных режимов показало сильную зависимость радиационного отклика МОПТ от значения и полярности приложенного потенциала. Внешний потенциал в зависимости от полярности приводит к формированию заряда у одной из границ раздела подзатворного оксида. В формировании зарядов в оксиде при облучении принимают участие дырки, поэтому основной заряд образуется у более отрицательного электрода (затвора или подложки). Заряд, сформированный у

границы раздела затвор–оксид, практически не влияет на приповерхностную область подложки и параметры МОПТ, поэтому больший радиационный отклик имеют МОПТ, облученные при положительном потенциале на затворе.

Для малых доз облучения (менее  $1.9 \cdot 10^4$  рад) поправочный коэффициент для перехода от активного режима рентгеновского облучения к пассивному не зависит от значения приложенного потенциала затвор–подложка, а определяется только его полярностью. При приложении отрицательного потенциала затвор–подложка в исследуемом диапазоне напряжений он соответствует пассивному режиму и составляет 38.5. При приложении положительного потенциала этот коэффициент также неизменен и составляет 120. Поэтому применение активного режима может уменьшить время облучения для получения необходимого радиационного отклика при неизменной мощности дозы, что обеспечивает уменьшение длительности испытаний.

**Заключение.** Результаты проведенных исследований и моделирования показали, что дозовые зависимости для гамма-облучения и временные зависимости для рентгеновского облучения в пассивном режиме имеют аналогичную форму, что позволяет ввести поправочный коэффициент пропорциональности, зависящий от мощности дозы рентгеновского облучения, позволяющий пересчитать временную зависимость в дозовую.

## Список литературы

1. Таперо К. И., Улимов В. Н., Членов А. М. Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах космического применения. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. 305 с.
2. Першенков В. С. Попов В. Д., Шальнов А. В. Поверхностные радиационные эффекты в элементах электронных микросхем. М.: Энергоатомиздат, 1988. 256 с.
3. Гуртов В. А. Влияние ионизирующего излучения на свойства МДП-приборов // Обзоры по электронной технике. Сер. 2. Полупроводниковые приборы / ЦНИИ Электроника. М., 1978. Вып. 14, № 505. С. 3–31.
4. Чумаков А. И. Действие космической радиации на интегральные схемы. М.: Радио и связь, 2004, 320 с.
5. Александров О. В., Мокрушина С. А. Модель накопления зарядов в *n*- и *p*-МОП-транзисторах при туннельной инжекции электронов из затвора // Физика и техника полупроводников. 2018. Вып. 6. С. 637–642. doi: 10.21883/FT.2018.06.45929.8717
6. Александров О. В. Влияние смещения на поведение МОП-структур при ионизирующем облучении // Физика и техника полупроводников. 2015. Т. 49, вып. 6. С. 793–798.
7. Benedetto J. M., Boesch H. E. The relationship between  $^{60}\text{Co}$  and 10 keV X-ray damage in MOS devices // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1986. Vol. NS-33, № 6. P. 1318–1923.
8. Поверхностные радиационные эффекты в интегральных схемах / А. В. Согоян, Г. И. Зебрев, А. Ю. Никифоров, В. С. Першенков, А. И. Чумаков // Модель космоса: в 2 т. Т. 1: Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов / под ред. Л. И. Панасюка и Л. С. Новикова. Гл. 1.18. М.: КДУ, 2007. С. 466–493.
9. Sensitivity of P-Channel MOSFET to X- and Gamma-Ray Irradiation / M. Pejovic, O. Ciraj-Bjelac, M. Kovacevic, Z. Rajovic, G. Ilic // Intern. J. of Photoenergy. 2013. Art. 158403. 7 p. doi: 10.1155/2013/158403
10. Чжо Ко Вин. Применение ионизирующего излучения для ускоренных испытаний МОП интегральных схем // Электронная техника. Сер. Полупроводниковые приборы. 2012. № 1 (228). С. 54–56.
11. Прогнозирование локальных радиационных эффектов в ИС при воздействии факторов космического пространства / А. И. Чумаков, А. Л. Васильев, А. А. Козлов, Д. О. Кольцов, А. В. Криницкий, А. А. Печен

кин, А. С. Тарараксин, А. В. Яненко // Микроэлектроника. 2010. Т. 39, № 2. С. 85–90.

12. Барабан А. П., Булавинов В. В., Коноров П. П. Электроника слоев SiO<sub>2</sub> на кремнии. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1988. 304 с.

13. Романов Н. М., Мокрушина С. А. Влияние гамма-облучения на МДП-структуры с тонким оксидом Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> // Перспективные материалы. 2018. № 2. С. 17–24. doi: 10.30791/1028-978X-2018-2-17-22

14. Коршунов Ф. П., Богатырев Ю. В., Вавилов В. А. Воздействие радиации на интегральные микросхемы. Минск: Наука и техника, 1986. 254 с.

15. Fleetwood D. M. Dual-transistor method to determine threshold-voltage shifts due to oxide-trapped charge and interface-traps in metal-oxide semiconductor devices // Appl. Phys. Lett. 1989. Vol. 55, iss. 5. P. 466–468. doi: 10.1063/1.101854

16. Oldham T. R., McLean F. B. Total ionizing dose effects in MOS oxides and devices // IEEE Trans. Nuclear Science. 2003. Vol. 50, № 3. P. 483–499. doi: 10.1109/TNS.2003.812927

17. Лазарь А. П., Коршунов Ф. П. Моделирование радиационной стойкости элементов логических КМОП интегральных схем // Докл. БГУИР. 2013. № 5. С. 17–23.

## Информация об авторах

**Мокрушина Светлана Андреевна** – инженер по специальности "Электронное приборостроение" (2006, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)), старший преподаватель кафедры электронного приборостроения указанного университета, ведущий инженер физико-химической лаборатории АО "Светлана–Полупроводники". Выпускница аспирантуры СПбГЭТУ "ЛЭТИ" по специальности "Твердотельная электроника" (2018). Автор 10 научных публикаций. Сфера научных интересов – твердотельная электроника.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5, Санкт-Петербург, 197376, Россия

E-mail: svetilnik\_84@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0003-1155-2911>

**Романов Николай Михайлович** – кандидат физико-математических наук (2019), начальник физико-химической лаборатории АО "Светлана–Полупроводники". Инженер кафедры физики полупроводников и наноэлектроники Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. Автор 25 научных работ. Сфера научных интересов – материаловедение, в частности тонкие органические и диэлектрические пленки.

Адрес: АО "Светлана–Полупроводники", пр. Энгельса, д. 27, Санкт-Петербург, 194156, Россия

E-mail: nikromanov.90@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-7814-7569>

## References

1. Tapero K. I., Ulimov V. N., Chlenov A. M. *Radiatsionnyye efekty v kremniyevykh integral'nykh skhemakh kosmicheskogo primeneniya* [Radiation Effects in Silicon Integrated Circuits for Space Applications]. Moscow, BINOM. Laboratoriya znaniy, 2012, 305 p. (In Russ.)

2. Pershenkov V. S., Popov V. D., Shal'nov A. V. *Poverkhnostnyye radiatsionnyye efekty v elementakh elektronnykh mikroskhem* [Surface Radiation Effects in Elements of Electronic Microcircuits]. Moscow, Energoatomizdat, 1988, 256 p. (In Russ.)

3. Gurtov V. A. *Vliyaniye ioniziruyushchego izlucheniya na svoystva MDP-priborov* [The Effect of Ionizing Radiation on the Properties of MIS Devices]. Reviews on Electronic Technology. Moscow, TSNII Elektronika, 1978, iss. 14, no. 595, pp. 3–31. (In Russ.)

4. Chumakov A. I. *Deystviye kosmicheskoy radiatsii na IS* [The Effect of Cosmic Radiation on Integrated Circuits]. Moscow, Radio i svyaz', 2004, 320 p. (In Russ.)

5. Aleksandrov O. V., Mokrushina S. A. Model for Charge Accumulation in *n*- and *p*-MOS Transistors during Tunneling Electron Injection from a Gate. Semiconductors. 2018, no. 52 (6), pp. 783–788. doi: 10.1134/S1063782618060027

6. Aleksandrov O. V. On the Effect of Bias on the Behavior of MOS Structures Subjected to Ionizing Radiation. Semiconductors. 2015, no. 49 (6), pp. 774–779. doi: 10.1134/S1063782615060020

7. Benedetto J. M., Boesch H. E. The Relationship Between <sup>60</sup>Co and 10 keV X-Ray Damage in MOS Devices. IEEE Trans. Nucl. Sci. 1986, no. 6, pp. 1318–1923.

8. Sogoyan A. V., Zebrev G. I., Nikiforov A. Yu., Pershenkov B. S., Chumakov A. I. *Poverkhnostnyye radiatsionnyye efekty v integral'nykh skhemakh* [Surface Radiation Effects in Integrated Circuits]. Space model. Vol. 1. Ed. by L. I. Panasyuk, L. S. Novikov. Moscow, KDU, 2007, pp. 466–493. (In Russ.)

9. Pejovic M., Ciraj-Bjelac O., Kovacevic M., Rajovic Z., Ilic G. Sensitivity of P-Channel MOSFET to X- and Gamma-Ray Irradiation. International Journal of Photoenergy. 2013, № 158403, pp. 1–7. doi: 10.1155/2013/158403

10. Chzho Ko Vin. The Use of Ionizing Radiation for Accelerated Testing of MOS Integrated Circuits. Electronic Engineering. Series 2. Semiconductor Devices. 2012, no. 1 (228), pp. 54–56. (In Russ.)

11. Chumakov A. I., Vasil'yev A. L., Kozlov A. A., Kol'tsov D. O., Krinitskiy A. V., Pechenkin A. A., Tararaksin A. S., Yanenko A. V. Prediction of Local Radiation Effects in Integrated Circuits under the Influence of Outer Space Factors. *Microelectronics*. 2010, vol. 39, no. 2, pp. 85–90. (In Russ.)

12. Baraban A. P., Bulavinov V. V., Konorov P. P. *Elektronika slojev SiO<sub>2</sub> na kremnii* [Electronics of SiO<sub>2</sub> Layers on Silicon]. Leningrad, *Izd. Leningradskogo universiteta*, 1988, 304 pp. (In Russ.)

13. Romanov N. M., Mokrushina S. A. Gamma Irradiation Effect to MOS Structures with Thin Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Oxide. *Prospective materials*. 2018, no. 2, pp. 17–24. (In Russ.) doi: 10.30791/1028-978X-2018-2-17-22

14. Korshunov F. P., Bogatyrev Yu. V., Vavilov V. A. The Effect of Radiation on Integrated Circuits. Minsk, Science and technology, 1986, 254 p. (In Russ.)

15. Fleetwood D. M. Dual-Transistor Method to Determine Threshold-Voltage Shifts Due to Oxide-Trapped Charge and Interface-Traps in MOS Devices. *Appl. Phys. Lett.* 1989, no. 55, pp. 466–468. doi:10.1063/1.101854

16. Oldham T. R. Total Ionizing Dose Effects in MOS Oxides and Devices. *IEEE Trans. Nuclear Physics*. 2003, no. 50 (3), pp. 483–499. doi: 10.1109/TNS.2003.812927

17. Lazar' A. P., Korshunov F. P. *Modelirovaniye radiatsionnoy stoykosti elementov logicheskikh KMOP integral'nykh skhem* [Modeling the Radiation Resistance of Elements of Logical CMOS Integrated Circuits]. *Doklady BGUIR*, 2013, no. 5, pp. 17–23. (In Russ.)

### Information about the authors

**Svetlana A. Mokrushina**, Engineer specializing in electronic instrumentation (2006, Saint Petersburg Electrotechnical University), Senior Lecturer of the Department of Electronic Instrumentation of named university, Lead Engineer of the Physical and Chemical Laboratory of JSC Svetlana–Semiconductors. The author of 10 scientific publications. Area of expertise: solid state electronics.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 Professor Popov Str., St Petersburg 197376, Russia

E-mail: svetilnik\_84@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0003-1155-2911>

**Nikolay M. Romanov**, Cand. Sci. (Rhus.-Math.) (2019), Head of the Physical and Chemical Laboratory of JSC Svetlana–Semiconductors. Engineer of the Department of Physics of Semiconductors and Nanoelectronics of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. The author of 25 scientific publications. Area of expertise: materials science, in particular thin organic and dielectric films.

Address: JSC Svetlana–Semiconductors, 27 Engels Ave., St Petersburg 194156, Russia

E-mail: nikromanov.90@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-7814-7569>

---