

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

RADIOELECTRONICS, INSTRUMENT-MAKING

УДК 621.382.3:539.12.04

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-4-402-408>

Поступила в редакцию 17.06.2022

Received 17.06.2022

Ю. В. Богатырев¹, Д. А. Огородников¹, С. Б. Ластовский¹, А. В. Кетько²,
М. М. Кречко², С. В. Шпаковский², П. В. Рубанов³, Г. А. Протопопов⁴, П. А. Чубунов⁴

¹Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению,
Минск, Республика Беларусь

²Филиал НТЦ «Белмикросистемы» ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»,
Минск, Республика Беларусь

³АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

⁴Филиал АО «Объединенная ракетно-космическая корпорация» – «НИИ космического приборостроения»,
Москва, Российская Федерация

ВЛИЯНИЕ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ПАРАМЕТРЫ *p*-КАНАЛЬНЫХ МОП-ТРАНЗИСТОРОВ

Аннотация. Представлены результаты экспериментальных исследований влияния гамма-излучения Co^{60} на основные параметры кремниевых эпитаксиально-планарных *p*-канальных МОП-транзисторов при различных электрических режимах. Транзисторы изготовлены по радиационно-стойкой ДМОП-технологии с проектными нормами 1,4 мкм. В результате исследований транзисторов установлено: значения всех основных параметров после дозы облучения $D = 10^6$ рад (SiO_2) в активных электрических режимах облучения остались в пределах критериев работоспособности; наиболее чувствительным к воздействию дозы облучения гамма-квантами является пороговое напряжение; в пассивном электрическом режиме облучения стойкость транзисторов по всем параметрам соответствует дозе $2,8 \cdot 10^6$ рад (SiO_2). Показано, что разная степень радиационной деградации исследуемых параметров при облучении обусловлена их зависимостью либо от эффектов ионизации в слоях подзатворных и изолирующих диэлектриков, либо от структурных нарушений в объемном кремнии активных областей транзисторов. Высокая радиационная стойкость исследованных *p*-канальных МОП-транзисторов позволяет рекомендовать их для использования в аппаратуре авиационной и космической техники.

Ключевые слова: *p*-канальный МОП-транзистор, гамма-излучение, радиационная стойкость, доза облучения, электрический режим

Для цитирования: Влияние ионизирующего излучения на параметры *p*-канальных МОП-транзисторов / Ю. В. Богатырев [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2022. – Т. 67, № 4. – С. 402–408. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-4-402-408>

Yuri V. Bogatyrev¹, Dzmitryi A. Aharodnikau¹, Stanislav B. Lastovsky¹, Aleksandr V. Ket'ko²,
Mikhail M. Krechko², Sergey V. Shpakovsky², Pavel V. Rubanov³, Grigory A. Protopopov⁴, Pavel A. Chubunov⁴

¹Scientific-Practical Materials Research Centre of National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

²Branch of STC “Belmikrosystems” OJSC “INTEGRAL” – Managing Company of the Holding “INTEGRAL”,
Republic of Belarus

³JSC “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation

⁴Branch of JSC “United Rocket and Space Corporation” – “Research Institute of Space Instrumentation”,
Moscow, Russian Federation

INFLUENCE OF IONIZING RADIATION ON THE PARAMETERS OF *p*-CHANNEL MOS TRANSISTORS

Abstract. The results of experimental studies of the influence of gamma radiation Co^{60} on the basic parameters of silicon epitaxial-planar *p*-channel MOSFET transistors under different electrical modes are presented. Transistors were manufactured according to radiation-resistant DMOS technology with design standards of 1.4 μm . As a result of transistor studies, it was established that the values of all basic parameters after the radiation dose $D = 10^6$ rads (SiO_2) in active electrical irradiation modes remained within the limits of the performance criteria; the parameter, most sensitive to influence of a dose of irradiation

tion by gamma-quanta is the threshold voltage; in the passive electrical irradiation mode the transistor's radiations resistance in all parameters corresponds to a dose of $2,8 \cdot 10^6$ rads (SiO_2). A sufficiently high radiation resistance of the studied p -channel MOSFETs makes it possible to recommend them for use in aviation and space equipment. The different degrees of radiation degradation of the studied parameters during irradiation are due to their dependence either on the effects of ionization in the layers of sub-gate and insulating dielectrics, or structural damage in the bulk silicon of the transistor active regions. The high radiation resistance of the studied p -channel MOSFETs allows recommending them for use in aviation and space equipment.

Keywords: p -channel MOSFET transistor, gamma radiation, radiation resistance, radiation dose, electrical mode

For citation: Bogatyrev Yu. V., Aharodnikau D. A., Lastovsky S. B., Ketko A. V., Krechko M. M., Shpakovsky S. V., Rubanov P. V., Protopopov G. A., Chubunov P. A. Influence of ionizing radiation on the parameters of p -channel MOS transistors. *Vestsi Natsyonal'noi akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2022, vol. 67, no. 4, pp. 402–408 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-4-402-408>

Введение. В настоящее время изделия электронной техники широко применяются в условиях воздействия ионизирующих излучений естественного и искусственного происхождения в промышленных, военных и космических объектах [1–3]. Поэтому обеспечение радиационной стойкости радиоэлектронной аппаратуры является актуальной задачей.

Радиационные эффекты в структурах металл–оксид–полупроводник (МОП) (ионизация, накопление объемного заряда в диэлектрике, образование поверхностных состояний на границе раздела Si-SiO_2) приводят к деградации электрических характеристик МОП-приборов [4–9]. Изучение характера этой деградации и ее зависимости от электрического состояния прибора представляет научный интерес и позволяет проводить конструкторско-технологическую оптимизацию изделий электронной техники спецназначения.

Цель данной работы – исследование влияния гамма-излучения Co^{60} на основные параметры кремниевых эпитаксиально-планарных p -канальных МОП-транзисторов при различных электрических режимах, определение их радиационной стойкости (по накопленной дозе).

Методика исследований. Объектом исследований являлись экспериментальные образцы кремниевых эпитаксиально-планарных МОП-транзисторов с обогащенным p -каналом и встроенным обратным смещенным диодом в малогабаритном металлокерамическом корпусе КТ-99-1 (аналог BSS84W). Транзисторы изготовлены по радиационно-стойкой ДМОП-технологии (методом двойной диффузии) [10] с проектными нормами 1,4 мкм.

На рис. 1 приведен разрез структуры кристалла исследуемого p -канального МОП-транзистора, где указаны конструктивные слои кристалла и его конструктивные области, меняющие свои свойства под воздействием облучения.

Основные параметры транзисторов: максимальное напряжение сток-исток $U_{\text{СИ max}} = -50$ В; максимальный постоянный ток стока $I_{\text{C max}} = -130$ мА.

Облучение образцов транзисторов гамма-квантами Co^{60} с энергией 1,25 МэВ осуществлялось на установке «Исследователь» при температуре 300 К. Мощность дозы гамма-излучения составляла 8 рад (SiO_2)/с, доза $D = 3 \cdot 10^4 \div 2,8 \cdot 10^6$ рад (SiO_2). Дозиметрия гамма-излучения проводилась образцовыми твердотельными стеклянными детекторами ДТС-0.01/1.0 с погрешностью $\pm 7\%$.

В процессе накопления дозы транзисторы находились в трех электрических режимах: 1) напряжение сток-исток $U_{\text{СИ}} = 0$ В, напряжение затвор-исток $U_{\text{ЗИ}} = -20$ В; 2) $U_{\text{СИ}} = -50$ В, $U_{\text{ЗИ}} = 0$ В; 3) пассивный режим ($U_{\text{СИ}} = 0$ В, $U_{\text{ЗИ}} = 0$ В).

Определение параметров транзисторов проводилось с помощью автоматизированного измерителя параметров полупроводниковых приборов ИППП-1/6.

Результаты экспериментальных исследований. Основные результаты влияния гамма-излучения Co^{60} на параметры МОП-транзисторов при различных электрических режимах приведены в таблице.

В результате исследований транзисторов установлено (см. таблицу):

значения всех исследуемых параметров после дозы облучения $D = 10^6$ рад (SiO_2) в активных электрических режимах облучения остались в пределах критериев работоспособности;

наиболее чувствительным к воздействию дозы облучения гамма-квантами Co^{60} является параметр $U_{\text{ЗИ пор}}$ (пороговое напряжение затвор-исток);

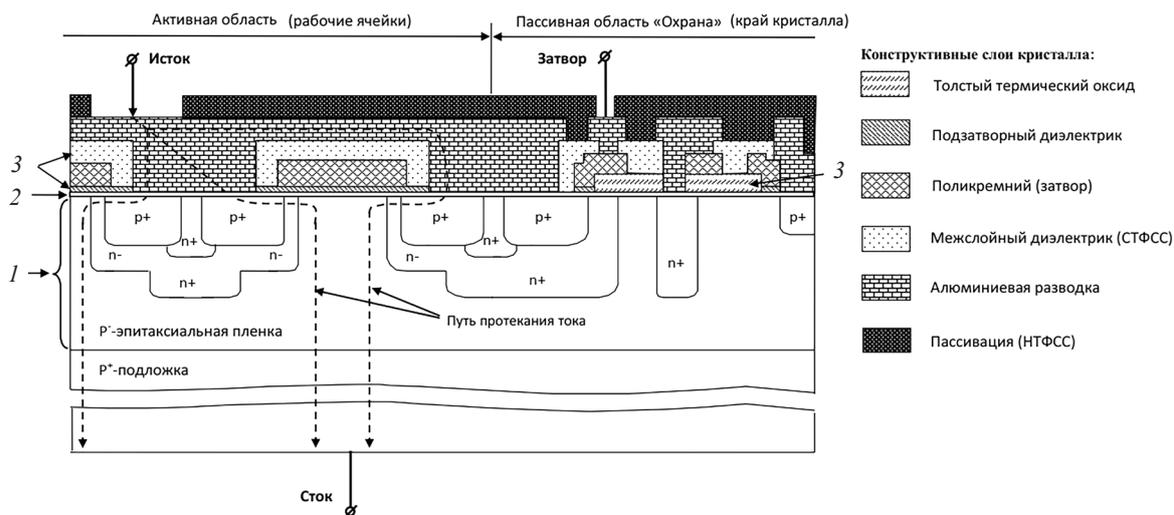


Рис. 1. Разрез структуры кристалла p -канального МОП-транзистора. Цифрами обозначены конструктивные области кристалла, меняющие свои свойства под воздействием облучения: 1 – кремниевая эпитаксиальная пленка – эффект ионизации; 2 – граница раздела Si–SiO₂ – эффект образования поверхностных состояний; 3 – слои термического и пиролитического SiO₂ – эффект накопления объемного заряда в диэлектрике

Fig. 1. A cross-section of the crystal structure of a p -channel MOSFET transistor. The numbers indicate the structural regions of the crystal that change their properties under the influence of irradiation: 1 – silicon epitaxial film – ionization effect; 2 – interface Si–SiO₂ – the effect of the formation of surface states; 3 – layers of thermal and pyrolytic SiO₂ – the effect of accumulation of bulk charge in the dielectric

в пассивном электрическом режиме облучения стойкость транзисторов по всем параметрам соответствует дозе $2,8 \cdot 10^6$ рад (SiO₂).

На рис. 2 представлены дозовые зависимости изменения порогового напряжения $\Delta U_{\text{зи пор}}$ p -канальных МОП-транзисторов, облучаемых в различных электрических режимах.

Установлено, что с увеличением дозы облучения происходит рост по абсолютной величине самого $U_{\text{зи пор}}$ и, соответственно, его изменения $\Delta U_{\text{зи пор}}$. Рост $|U_{\text{зи пор}}|$, $|\Delta U_{\text{зи пор}}|$ замедляется при больших дозах облучения.

В диапазоне доз до $D = 3 \cdot 10^5$ рад (SiO₂) существенного отличия между различными электрическими режимами в процессе облучения по степени влияния на величину $\Delta U_{\text{зи пор}}$ не обнару-

Критерии работоспособности и основные результаты измерения параметров транзисторов после набора соответствующей дозы при различных электрических режимах

Performance criteria and main results of measuring transistor parameters after the appropriate dose is received under various electrical modes

Наименование параметра (режимы измерения)	Критерий работоспособности		Результаты измерения параметров до и после облучения при различных электрических режимах						
	не менее	не более	$U_{\text{си}} = 0 \text{ В}, U_{\text{зи}} = -20 \text{ В}$		$U_{\text{си}} = -50 \text{ В}, U_{\text{зи}} = 0 \text{ В}$		$U_{\text{си}} = 0 \text{ В}, U_{\text{зи}} = 0 \text{ В}$ (пассивный режим)		
			$D = 0$	10^6 рад (SiO ₂)	$D = 0$	10^6 рад (SiO ₂)	$D = 0$	10^6 рад (SiO ₂)	$2,8 \cdot 10^6$ рад (SiO ₂)
Начальный ток стока, $I_{\text{с нач}}$, мА ($U_{\text{си}} = -50 \text{ В}, U_{\text{зи}} = 0 \text{ В}$)	–	$ -3,0 $	$-9,48 \times 10^{-6}$	$-4,49 \times 10^{-6}$	$-2,8 \times 10^{-6}$	$-6,9 \times 10^{-7}$	$-5,2 \times 10^{-6}$	$-2,36 \times 10^{-6}$	$-2,67 \times 10^{-6}$
Ток утечки затвора, $I_{\text{з ут}}$, нА ($U_{\text{си}} = 0 \text{ В}, U_{\text{зи}} = \pm 20 \text{ В}$)	–	$ \pm 100 $	+8,68 –10,06	+0,42 –2,23	+0,59 –2,76	+1,33 –0,82	+3,13 –1,42	+0,05 –2,03	+0,36 –1,67
Пороговое напряжение, $U_{\text{зи пор}}$, В ($U_{\text{си}} = U_{\text{зи}}, I_{\text{с}} = -1 \text{ мА}$)	$ -0,5 $	$ -2,75 $	–1,84	–2,23	–1,85	–2,14	–1,89	–2,18	–2,4
Сопротивление сток-исток в открытом состоянии, $R_{\text{си отк}}$, Ом ($U_{\text{зи}} = -5 \text{ В}, I_{\text{с}} = -0,1 \text{ А}$)	–	12	6,26	6,56	6,27	6,81	6,34	6,72	6,98
Постоянное прямое напряже- ние диода, $U_{\text{пр}}$, В ($U_{\text{зи}} = 0 \text{ В}, I_{\text{с}} = 0,1 \text{ А}$)	–	1,8	0,855	0,858	0,855	0,854	0,855	0,856	0,862

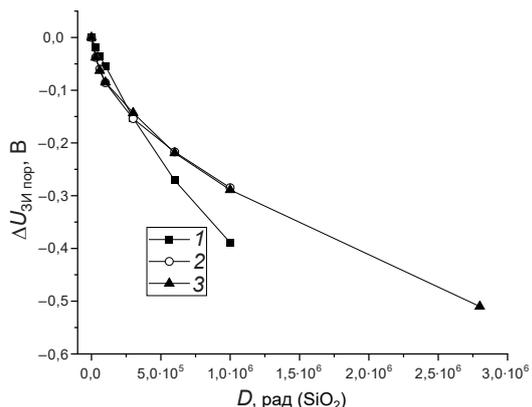


Рис. 2. Дозовые зависимости изменения порогового напряжения $\Delta U_{зи пор}$ p -канальных МОП транзисторов, облучаемых гамма-квантами Co^{60} в различных электрических режимах: кривая 1 – $U_{СИ} = 0$ В, $U_{ЗИ} = -20$ В; кривая 2 – $U_{СИ} = -50$ В, $U_{ЗИ} = 0$ В; кривая 3 – пассивный электрический режим

Fig. 2. Dose dependencies of changes in the threshold voltage $\Delta U_{GS thresh}$ of p -channel MOSFETs irradiated by gamma-ray quanta Co^{60} in various electrical modes: curve 1 – $U_{SD} = 0$ V, $U_{GS} = -20$ V; curve 2 – $U_{SD} = -50$ V, $U_{GS} = 0$ V; curve 3 – passive electric mode

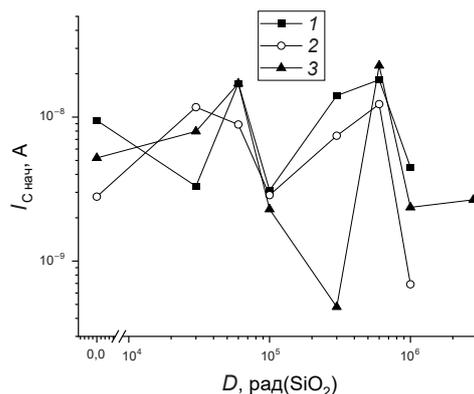


Рис. 3. Дозовые зависимости начального тока стока p -канальных МОП-транзисторов, облучаемых в различных электрических режимах гамма-квантами Co^{60} . Режимы облучения: кривая 1 – $U_{СИ} = 0$ В, $U_{ЗИ} = -20$ В; кривая 2 – $U_{СИ} = -50$ В, $U_{ЗИ} = 0$ В; кривая 3 – пассивный электрический режим

Fig. 3. Dose dependencies of changes in the initial drain current of p -channel MOSFETs irradiated by gamma-ray quanta Co^{60} in various electrical modes: curve 1 – $U_{SD} = 0$ V, $U_{GS} = -20$ V; curve 2 – $U_{SD} = -50$ V, $U_{GS} = 0$ V; curve 3 – passive electric mode

жено. При дозе $D = 10^6$ рад (SiO_2) максимальный уровень $|\Delta U_{зи пор}|$ зафиксирован для режима $U_{СИ} = 0$ В, $U_{ЗИ} = -20$ В (0,44 В против 0,31 В на других режимах).

На рис. 3 представлены дозовые зависимости начального тока стока p -канальных МОП-транзисторов, облучаемых в различных электрических режимах гамма-квантами Co^{60} . Видно, что значения $I_{C нач}$ после облучения не превысили 20–30 нА при критерии работоспособности не более 3 мА. После анализа результатов становится ясно, что режим облучения особо не влияет на данный параметр. Следовательно, можно заключить, что по параметру «начальный ток стока» ($I_{C нач}$) радиационная стойкость транзисторов во всех электрических режимах испытаний соответствует дозе 10^6 рад.

На рис. 4 показаны дозовые зависимости сопротивления сток-исток в открытом состоянии ($R_{СИ отк}$) p -канальных МОП-транзисторов, облучаемых в различных электрических режимах. Критерий работоспособности по данному параметру составляет не более 12 Ом. Все полученные значения не превышают 7 Ом. Более критичным для параметра $R_{СИ отк}$ транзисторов является режим облучения при $U_{СИ} = -50$ В, $U_{ЗИ} = 0$ В. По параметру $R_{СИ отк}$ радиационная стойкость транзисторов во всех электрических режимах испытаний соответствует дозе 10^6 рад (SiO_2).

Дозовые зависимости постоянного прямого напряжения диода ($U_{пр}$) p -канальных МОП-транзисторов, облучаемых в различных электрических режимах, представлены на рис. 5. Критерий работоспособности по данному параметру составляет не более 1,8 В. Полученные результаты показывают, что значение $U_{пр}$ всех образцов при дозе $D = 10^6$ рад (SiO_2) не превышает 0,86 В. По параметру $U_{пр}$ радиационная стойкость транзисторов во всех электрических режимах испытаний соответствует дозе 10^6 рад (SiO_2).

По накопленной дозе радиационные эффекты делят на ионизационные и структурные [1–5]. Ионизационные связаны с накоплением заряда в диэлектрических слоях и увеличением плотности поверхностных состояний на границах раздела полупроводник–диэлектрик. Структурные эффекты обусловлены смещением атомов из узлов кристаллической решетки кремния. Основная доля энергии проникающих излучений при взаимодействии с твердыми телами тратится на ионизационные эффекты.

Из всех исследуемых в данной работе параметров p -канальных МОП-транзисторов пороговое напряжение $U_{зи пор}$ в наибольшей степени определяется состоянием подзатворного диэлектрика и границы раздела $Si-SiO_2$, чем и вызвана высокая чувствительность данного параметра к поглощенной дозе гамма-квантов. Общим в характере зависимостей $\Delta U_{зи пор}(D)$ является отри-

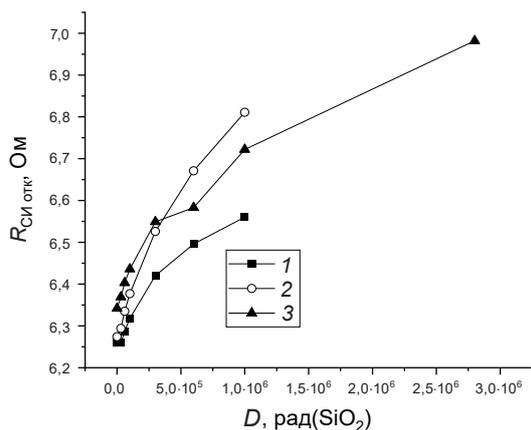


Рис. 4. Дозовые зависимости сопротивления сток-исток в открытом состоянии $R_{СИ\ отк}$ p -канальных МОП-транзисторов, облучаемых в различных электрических режимах гамма-квантами Co^{60} . Режимы облучения: кривая 1 – $U_{СИ} = 0$ В, $U_{ЗИ} = -20$ В; кривая 2 – $U_{СИ} = -50$ В, $U_{ЗИ} = 0$ В; кривая 3 – пассивный электрический режим

Fig. 4. Dose dependencies of changes in the resistance of the drain-source in the open state of p -channel MOSFETs irradiated by gamma-ray quanta Co^{60} in various electrical modes: curve 1 – $U_{SD} = 0$ V, $U_{GS} = -20$ V; curve 2 – $U_{SD} = -50$ V, $U_{GS} = 0$ V; curve 3 – passive electric mode

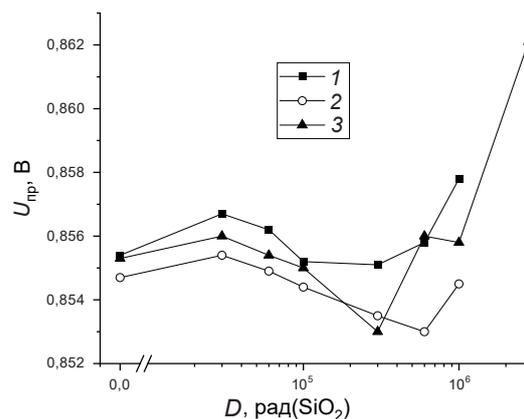


Рис. 5. Дозовые зависимости постоянного прямого напряжения диода $U_{пр}$ p -канальных МОП-транзисторов, облучаемых в различных электрических режимах гамма-квантами Co^{60} . Режимы облучения: кривая 1 – $U_{СИ} = 0$ В, $U_{ЗИ} = -20$ В; кривая 2 – $U_{СИ} = -50$ В, $U_{ЗИ} = 0$ В; кривая 3 – пассивный электрический режим

Fig. 5. Dose dependencies of changes in the direct voltage diode of p -channel MOSFETs irradiated by gamma-ray quanta Co^{60} in various electrical modes: curve 1 – $U_{SD} = 0$ V, $U_{GS} = -20$ V; curve 2 – $U_{SD} = -50$ V, $U_{GS} = 0$ V; curve 3 – passive electric mode

цательное значение $\Delta U_{ЗИ\ пор}$ (сдвиг пороговых напряжений в сторону более отрицательных значений), что обусловлено захватом свободных носителей заряда (дырок) на глубокие центры (ловушки) в объеме подзатворного SiO_2 , а также увеличением плотности поверхностных состояний (ПС) на границе раздела $Si-SiO_2$ [4–7]. В случае p -канальных МОП-транзисторов индуцируемые облучением заряд в ПС и заряд в объеме диэлектрика совпадают по знаку (положительному).

Ток утечки затвора ($I_{3_{ут}}$, см. таблицу) определяется электрическими характеристиками подзатворного и изолирующего диэлектриков, на проводимость которых оказывает заметное влияние накопленный заряд. Наблюдаемые нами незначительные изменения значений $I_{3_{ут}}$ при облучении вызваны, вероятно, накоплением положительного объемного фиксированного заряда, приводящего к уменьшению высоты и толщины потенциального барьера на границе диэлектрической пленки, что способствует эмиссии в нее электронов [1].

Такие параметры исследуемых транзисторов, как начальный ток стока, сопротивление сток-исток в открытом состоянии и постоянное прямое напряжение диода, определяются прежде всего объемными свойствами полупроводникового материала. Сопротивление объемного кремния с увеличением дозы облучения возрастает в результате введения радиационных дефектов, которые являются ловушками захвата и рассеивающими центрами для свободных носителей заряда [2, 4]. Так, на рис. 1 показаны пути прохождения тока стока. Видно, что значение $R_{СИ\ отк}$ определяется сопротивлениями эпитаксиального $p-Si$ и p -канала. Следовательно, наблюдаемое в ходе исследования незначительное монотонное увеличение значения $R_{СИ\ отк}$ с ростом дозы облучения обусловлено радиационными дефектами, вводимыми в слой эпитаксиального $p-Si$ и область p -канала (см. рис. 4). Слабость наблюдаемого эффекта связана с незначительной концентрацией введенных дефектов при используемых в данной работе дозах гамма-квантов.

Радиационные дефекты представляют собой генерационно-рекомбинационные центры в активных областях приборных структур [2, 4]. Начальный ток стока определяется в значительной степени обратными токами утечки встроенного диода, который образован слоями n^+-Si , $p-Si$ и p^+-Si (см. рис. 1). Радиационные дефекты в менее легированном базовом слое $p-Si$ выступают основными центрами генерации электронно-дырочных пар в области пространственного заряда обратно-смещенного диода. Из зависимостей $I_{C\ нач}(D)$ можно заключить, что особых изменений измеряемый параметр в диапазоне исследуемых доз гамма-квантов не претерпевает, так как наблюдаются лишь незначительные немонотонные изменения его значений. Это может быть свя-

зано с малостью концентрации введенных радиационных дефектов, либо типы вводимых дефектов не являются эффективными центрами генерации электронно-дырочных пар (например, их глубокие уровни расположены далеко от середины запрещенной зоны кремния).

С зависимостями $I_{C\text{ нач}}(D)$ согласуются и зависимости постоянного прямого напряжения диода от дозы гамма-квантов (см. рис. 5). Здесь также не наблюдается существенных изменений $U_{\text{пр}}$ до дозы $D = 1 \cdot 10^6$ рад. При высоком уровне инжекции неосновных носителей заряда значение $U_{\text{пр}}$ зависит от соотношения диффузионной длины электронов L_n и толщины p -базы W_p . Значение L_n снижается с ростом концентрации рекомбинационных центров, то есть с уменьшением времени жизни электронов в p -базе. Пока $L_n \geq W_p$, проводимость базы полностью модулируется электронами, что обеспечивает относительно небольшие значения $U_{\text{пр}}$. В противном случае должно наблюдаться увеличение $U_{\text{пр}}$ с ростом поглощенной дозы.

Заключение. Проведено исследование влияния гамма-излучения Co^{60} на основные параметры кремниевых эпитаксиально-планарных p -канальных МОП-транзисторов в активном и пассивном электрических режимах, а также определена радиационная стойкость транзисторов (по накопленной дозе).

Установлено, что пороговое напряжение $U_{\text{зи пор}}$ является наиболее чувствительным параметром к воздействию облучения. При $D = 1 \cdot 10^6$ рад (SiO_2) его значение по абсолютной величине возросло на 21 % в режиме облучения при $U_{\text{СИ}} = 0$ В, $U_{\text{ЗИ}} = -20$ В и на 15 % – в режимах при $U_{\text{СИ}} = -50$ В, $U_{\text{ЗИ}} = 0$ В и $U_{\text{СИ}} = 0$ В, $U_{\text{ЗИ}} = 0$ В.

Значения начального тока стока $I_{C\text{ нач}}$, сопротивления сток-исток в открытом состоянии $R_{\text{СИ отк}}$ и постоянного прямого напряжения диода $U_{\text{пр}}$ с увеличением дозы облучения изменяются незначительно. Так, при $D = 1 \cdot 10^6$ рад увеличение значения $R_{\text{СИ отк}}$ составило порядка 5–8 %, а изменения значения $U_{\text{пр}}$ не превысили 0,2 %. На дозовых зависимостях $I_{C\text{ нач}}$ наблюдаются незначительные немонотонные изменения.

В активном электрическом режиме облучения значения всех исследуемых параметров остались в пределах критериев работоспособности после дозы $D = 10^6$ рад, а в пассивном – $2,8 \cdot 10^6$ рад.

Разная степень радиационной деградации исследуемых параметров транзисторов обусловлена их зависимостью либо от эффектов ионизации в слоях подзатворных и изолирующих диэлектриков, либо от структурных нарушений в объемном кремнии активных областей приборных структур. Высокая чувствительность $U_{\text{зи пор}}$ к облучению объясняется захватом свободных носителей заряда на глубокие центры в объеме подзатворного SiO_2 , а также увеличением плотности поверхностных состояний на границе раздела Si-SiO_2 . Предполагается, что изменения значений тока утечки затвора при облучении также вызваны накоплением положительного объемного фиксированного заряда, приводящего к уменьшению высоты и толщины потенциального барьера на границе диэлектрической пленки, что способствует эмиссии в нее электронов. Наблюдаемые изменения $I_{C\text{ нач}}$, $U_{\text{пр}}$ связаны преимущественно с введением радиационных дефектов в области эпитаксиального слоя $p\text{-Si}$, а $R_{\text{СИ отк}}$ – $p\text{-Si}$ и p -канала.

Полученные результаты представляют интерес с точки зрения конструкторско-технологической оптимизации изделий в части радиационной стойкости. Достаточно высокая радиационная стойкость исследованных p -канальных МОП-транзисторов позволяет рекомендовать их для использования в аппаратуре авиационной и космической техники.

Список использованных источников

1. Белоус, А. И. Космическая электроника / А. И. Белоус, В. А. Солодуха, С. В. Шведов. – М.: Техносфера, 2015. – Кн. 2. – 732 с.
2. Радиационная стойкость изделий ЭКБ / под ред. А. И. Чумакова. – М.: Нац. исслед. ядер. ун-т «МИФИ», 2015. – 512 с.
3. Ионизирующие излучения космического пространства и их воздействие на бортовую аппаратуру космических аппаратов / под ред. Г. Г. Райкунова. – М.: Физматлит, 2013. – 256 с.
4. Першенков, В. С. Поверхностные радиационные эффекты в элементах интегральных микросхем / В. С. Першенков, В. Д. Попов, А. В. Шальнов. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 256 с.
5. Коршунов, Ф. П. Воздействие радиации на интегральные микросхемы / Ф. П. Коршунов, Ю. В. Богатырев, В. А. Вавилов. – Минск: Наука и техника, 1986. – 254 с.
6. Ma, T. P. Ionizing Radiation Effects in MOS Devices and Circuits / T. P. Ma, P. V. Dressendorfer. – New York: John Wiley & Sons, 1989. – 587 p. <https://doi.org/10.1148/radiology.174.3.886>
7. Чумаков, А. И. Действие космической радиации на интегральные схемы / А. И. Чумаков. – М.: Радио и связь, 2004. – 320 с.
8. Claeys, C. Radiation Effects in Advanced Semiconductor Materials and Devices / C. Claeys, E. Simoen. – Berlin: Springer, 2002. – 402 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-04974-7>

9. Таперо, К. И. Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах космического применения / К. И. Таперо, В. Н. Улимов, А. М. Членов. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. – 304 с.
 10. Baliga, B. J. *Silicon RF Power MOSFETS* / B. J. Baliga. – N. Y.: World Scientific. 2005. – 302 p.

References

1. Belous A. I., Soloduha V. A., Shvedov S. V. *Space Electronics. Book 2*. Moscow, Technosfera Publ., 2015. 732 p. (in Russian).
2. Chumakov A. I. (ed.) *Radiation Hardness of Electronics Products*. Moscow, National Research Nuclear University MEPhI, 2015. 512 p. (in Russian).
3. Raikunov G. G. (ed.) *Ionizing Radiation of Outer Space and their Impact on the Onboard Equipment of Spacecraft*. Moscow, Fizmatlit Publ., 2013. 256 p. (in Russian).
4. Pershenkov V. S., Popov V. D., Shal'nov A. V. *Surface Radiation Effects in Elements of Integrated Circuits*. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1988. 256 p. (in Russian).
5. Korshunov F. P., Bogatyrev Yu. V., Vavilov V. A. *Effects of Radiation on Integrated Circuits*. Minsk, Nauka i tehnika Publ., 1986. 254 p. (in Russian).
6. Ma T. P., Dressendorfer P. V. *Ionizing Radiation Effects in MOS Devices and Circuits*. New York, John Wiley & Sons, 1989. 587 p. <https://doi.org/10.1148/radiology.174.3.886>
7. Chumakov A. I. *Effects of Cosmic Radiation on Integrated Circuits*. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 2004. 320 p. (in Russian).
8. Claeys C., Simoen E. *Radiation Effects in Advanced Semiconductor Materials and Devices*. Berlin, Springer, 2002. 402 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-04974-7>
9. Tapero K. I., Ulimov V. N., Chlenov A. M. *Radiation Effects in Silicon Integrated Circuits for Space Applications*. Moscow, BINOM. Laboratoriya znaniy Publ., 2012. 304 p. (in Russian).
10. Baliga B. J. *Silicon RF Power MOSFETS*. New York, World Scientific, 2005. 302 p.

Информация об авторах

Богатырев Юрий Владимирович – доктор технических наук, главный научный сотрудник лаборатории радиационных воздействий, Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровка, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: bogat@ifftp.bas-net.by

Огородников Дмитрий Александрович – младший научный сотрудник лаборатории радиационных воздействий, Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровка, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: ogorodnikov@ifftp.bas-net.by

Ластовский Станислав Брониславович – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией радиационных воздействий, Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровка, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: lastov@ifftp.bas-net.by

Кетько Александр Владимирович – директор филиала НТЦ «Белмикросистемы» ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» (ул. Казинца, 121а, 220108, Минск, Республика Беларусь).

Кречко Михаил Михайлович – начальник бюро филиала НТЦ «Белмикросистемы» ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» (ул. Казинца, 121а, 220108, Минск, Республика Беларусь).

Шпаковский Сергей Васильевич – начальник отделения филиала НТЦ «Белмикросистемы» ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» (ул. Казинца, 121а, 220108, Минск, Республика Беларусь).

Рубанов Павел Владимирович – кандидат технических наук, начальник сектора, АО «Российские космические системы» (ул. Авиамоторная, 53, 111250, Москва, Российская Федерация).

Протопопов Григорий Александрович – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, филиал АО «Объединенная ракетно-космическая корпорация» – «НИИ космического приборостроения» (ул. Авиамоторная, 53, 111250, Москва, Российская Федерация).

Чубунов Павел Александрович – начальник НПК НТЦ-1, филиал АО «Объединенная ракетно-космическая корпорация» – «НИИ космического приборостроения» (ул. Авиамоторная, 53, 111250, Москва, Российская Федерация).

Information about the authors

Yuri V. Bogatyrev – Dr. Sc. (Engineering), Chief Researcher of the Radiation Effects Laboratory, Scientific-Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: bogat@ifftp.bas-net.by

Dzmitryi A. Aharodnikau – Junior Researcher of the Radiation Effects Laboratory, Scientific-Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ogorodnikov@ifftp.bas-net.by

Stanislav B. Lastovski – Ph. D. (Physics and Mathematics), Head of the Radiation Effects Laboratory, Scientific-Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: lastov@ifftp.bas-net.by

Aleksandr V. Ket'ko – Director of the Branch of STC “Belmikrosystems” OJSC “INTEGRAL” – Managing Company of the Holding “INTEGRAL” (121a, Kazinets Str., 220108, Minsk, Republic of Belarus).

Mikhail M. Krechko – Head of the Bureau of the Branch of STC “Belmikrosystems” OJSC “INTEGRAL” – Managing Company of the Holding “INTEGRAL” (121a, Kazinets Str., 220108, Minsk, Republic of Belarus).

Sergey V. Shpakovsky – Head of the Department of the Branch of STC “Belmikrosystems” OJSC “INTEGRAL” – Managing Company of the Holding “INTEGRAL” (121a, Kazinets Str., 220108, Minsk, Republic of Belarus).

Pavel V. Rubanov – Ph. D. (Engineering), Head of the Sector, JSC “Russian Space Systems” (53, Aviamotornaya Str., 111250, Moscow, Russian Federation).

Grigory A. Protopopov – Ph. D. (Engineering), Leading Researcher, Branch of JSC “United Rocket and Space Corporation” – “Research Institute of Space Instrumentation” (53, Aviamotornaya Str., 111250, Moscow, Russian Federation).

Pavel A. Chubunov – Head of SPC STC-1, Branch of JSC “United Rocket and Space Corporation” – “Research Institute of Space Instrumentation” (53, Aviamotornaya Str., 111250, Moscow, Russian Federation).