

ISSN 1561-2430 (Print)  
 ISSN 2524-2415 (Online)  
 УДК 621.383.292  
<https://doi.org/10.29235/1561-2430-2024-60-3-252-262>

Поступила в редакцию 05.04.2024  
 Received 05.04.2024

Д. А. Огородников<sup>1</sup>, С. Б. Ластовский<sup>1</sup>, Ю. В. Богатырев<sup>1</sup>, А. М. Лемешевская<sup>2</sup>,  
 В. С. Цымбал<sup>2</sup>, С. В. Шпаковский<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению,  
 Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>ОАО «ИНТЕГРАЛ» – Управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ», Минск, Республика Беларусь

## ВЛИЯНИЕ ГАММА-ОБЛУЧЕНИЯ НА ОБРАТНЫЕ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КРЕМНИЕВЫХ ФОТОУМНОЖИТЕЛЕЙ

**Аннотация.** Исследовано влияние гамма-квантов  $\text{Co}^{60}$  на обратную вольт-амперную характеристику (ВАХ) кремниевых фотоэлектронных умножителей (SiФЭУ) с 1004 ячейками, представляющими собой оптически изолированные друг от друга  $n^+p-p^+$ -структуры. Оптическая изоляция ячеек осуществлялась канавками, которые после пассивации стенок слоями  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Si}_3\text{N}_4$  заполнялись вольфрамом. Исследовались SiФЭУ двух вариантов конструктивного исполнения. В первом варианте (BI) вывод металла канавки электрически соединялся через гасящий поликремниевый резистор с  $n^+$ -областью ячейки, во втором (BII) – с  $p^+$ -областью. Напряжение пробоя исследуемых SiФЭУ составляло  $U_{br} = 34 \pm 1,0$  В. Образцы облучались в режиме лавинного пробоя (активный электрический режим) и при обратном смещении  $U_b = 0$  В (пассивный режим). Установлено, что при значении поглощенной дозы  $D = 10^6$  рад темновой ток возрастает в 6–7 раз у SiФЭУ (BI) и (BII), облучаемых в пассивном режиме, и в 15–16 раз у SiФЭУ (BII), облучаемых в активном режиме. Для SiФЭУ (BI), облучаемых в режиме лавинного пробоя, значение темнового тока возрастает в  $10^4$  раз при  $D = 10^5$  рад. Показано, что радиационная деградация темнового тока исследуемых SiФЭУ вызвана увеличением генерационной и главным образом поверхностной составляющих в результате накопления положительного заряда в изолирующем слое разделительных канавок.

**Ключевые слова:** кремниевые фотоумножители, вольт-амперная характеристика, лавинный пробой, гамма-излучение, радиационная стойкость

**Для цитирования.** Влияние гамма-облучения на обратные вольт-амперные характеристики кремниевых фотоумножителей / Д. А. Огородников [и др.] // Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук. – 2024. – Т. 60, № 3. – С. 252–262. <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2024-60-3-252-262>

Dzmitryi A. Aharodnikau<sup>1</sup>, Stanislav B. Lastovskii<sup>1</sup>, Yuri V. Bogatyrev<sup>1</sup>, Alla M. Lemeshevskaya<sup>2</sup>,  
 Uladzimir S. Tsymbal<sup>2</sup>, Sergey V. Shpakovski<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Scientific-Practical Materials Research Centre of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

<sup>2</sup>JSC “INTEGRAL” – manager holding company “INTEGRAL”, Minsk, Republic of Belarus

## INFLUENCE OF GAMMA IRRADIATION ON THE REVERSE CURRENT-VOLTAGE CHARACTERISTICS OF SILICON PHOTOMULTIPLIERS

**Abstract.** The study investigated the effect of  $\text{Co}^{60}$  gamma-quanta on the reverse current-voltage characteristic (IV) of silicon photomultiplier (SiPMs) with 1004 cells, which themselves were optically isolated from each other  $n^+p-p^+$ -structures. The cells were optically isolated from each other by trenches filled with tungsten after passivation of the walls with  $\text{SiO}_2$  and  $\text{Si}_3\text{N}_4$  layers. Two variants of structural design of SiPMs were studied. Two variants were tested for the trench metal connection in the SiPMs: variant BI connected the trench metal to the  $n^+$ -region of the cell through a quenching polysilicon resistor, while variant BII connected it to the  $p^+$ -region. The breakdown voltage of the investigated SiPMs was  $U_{br} = 34 \pm 1.0$  V. The samples were irradiated in both the active electrical mode (avalanche breakdown mode) and the passive mode (reverse bias  $U_b = 0$  V). It was discovered, that at dose of  $D = 10^6$  rad, the dark current for SiPM (BI) and (BII) increased by 6–7 times when irradiated in passive mode and by 15–16 times for SiPM (BII) when irradiated in active mode. For SiPM (BI) irradiated in the avalanche breakdown mode, the dark current increased by  $10^4$  times at  $D = 10^5$  rad. The research demonstrates that the radiation-induced degradation of the dark current in the SiPMs under study is due to an increase in the generation and, primarily, surface components. This is a result of the accumulation of positive charge in the insulating layer of the separating trenches.

**Keywords:** silicon photomultipliers, volt-ampere characteristic, avalanche breakdown, gamma radiation, radiation hardness

**For citation.** Aharodnikau D. A., Lastovskii S. B., Bogatyrev Y. V., Lemeshevskaya A. M., Tsymbal U. S., Shpakovski S. V. Influence of gamma irradiation on the reverse current-voltage characteristics of silicon photomultipliers. *Vestsi Natsyonal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-matematychnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physics and Mathematics series*, 2024, vol. 60, no. 3, pp. 252–262 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2024-60-3-252-262>

**Введение.** Кремниевые фотоэлектронные умножители (SiФЭУ) относятся к приборам с внутренним усилением и предназначены для регистрации предельно слабого оптического излучения видимого и ближнего инфракрасного диапазонов, ионизирующих излучений и единичных фотонов. SiФЭУ содержат на одном кремниевом кристалле матрицу ячеек, каждая из которых представляет собой диод и включенный последовательно с ним горячий резистор [1, 2]. Все ячейки матрицы соединены параллельно. Приборы данного типа могут быть использованы в различных областях промышленности, научных исследованиях, медицинской технике, квантовой криптографии, приемниках детектирования ионизирующих частиц, лидарах, биофотонике и др. [3–7].

Один из основных недостатков SiФЭУ связан с эффектом перекрестных помех (cross-talk effect) [8–10]. Релаксация горячих носителей при лавинном пробое кремниевых  $p$ – $n$ -переходов сопровождается световым излучением, квантовая эффективность которого составляет примерно один фотон на  $10^5$ – $10^6$  носителей заряда, проходящих через  $p$ – $n$ -переход [11–13]. Несмотря на столь незначительную генерацию фотонов, это становится серьезным препятствием использования SiФЭУ в ряде приложений [8–10]. Обычно SiФЭУ работают с коэффициентом усиления  $\sim 10^6$ , что дает десятки фотонов в каждой лавине. Генерируемые в одной из ячеек фотоны распространяются внутри объема SiФЭУ и вызывают срабатывание соседних ячеек, что ухудшает амплитудное разрешение прибора и вносит значительный вклад в коэффициент шума.

Паразитные фотоны попадают в соседние ячейки по прямым оптическим путям, а также в результате отражения от подложки чипа (об этом см. подробнее в [9, 10]). Прямые оптические пути фотонам перекрывают канавками, которые получают травлением кремния в процессе изготовления SiФЭУ. Для уменьшения количества отраженных фотонов в объеме и/или на обратной поверхности подложки создают светопоглощающие слои. При этом считается, что вероятность прохождения фотонов через материал подложки и отражения от нижней плоскости достаточно низкая. Так, при толщине подложки 300 мкм она составляет  $1,4 \cdot 10^{-12}$  [14]. Следовательно, эффективным способом устранения перекрестных помех является оптическая изоляция ячеек канавками. В [9] показано, что с помощью канавок, покрытых только слоем  $\text{SiO}_2$ , интенсивность перекрестных помех уменьшается в 9 раз. Для усиления оптической изоляции канавки заполняют металлом [15, 16].

В [17] в программном комплексе Silvaco исследовалось распределение объемной плотности накопленного заряда в слое  $\text{SiO}_2$  металлизированной канавки в результате воздействия на ячейки SiФЭУ рентгеновского излучения с энергией 10 кэВ. Ячейки представляли собой оптически изолированные друг от друга  $n^+$ – $p$ – $p^+$ -структуры в двух вариантах конструктивного исполнения. В первом варианте вывод металла канавки электрически соединялся с  $n^+$ -областью ячеек, а в другом – с  $p^+$ -областью. В результате моделирования установлено, что максимальное значение накопленного заряда достигается для первого варианта ячеек, облучаемых при обратном смещении, равном  $-30$  В. Полученный результат объясняется усилением выхода заряда дырок под действием электрических полей в слоях оксида разделительных канавок. Сделано предположение о возможном влиянии накопленного заряда на величину темнового тока SiФЭУ. Представляет интерес экспериментальное исследование влияния ионизирующих излучений на параметры фотоумножителей с конструктивным исполнением ячеек, как и в работе [17].

Известно, что наиболее критическим радиационным эффектом в SiФЭУ, облученных протонами, нейтронами, электронами и гамма-квантами, является увеличение темнового счета – DCR (dark count rate) [18–21]. DCR – это количество сигналов в единицу времени на выходе SiФЭУ в отсутствие световых сигналов на входе [22]. Темновой счет определяется темновым током и связан с умножением носителей, которые генерируются в области пространственного заряда (ОПЗ)  $p$ – $n$ -переходов ячеек в результате теплового возбуждения или туннельного эффекта.

Цель данной работы – исследование влияния облучения гамма-квантами  $\text{Co}^{60}$  на обратную вольт-амперную характеристику (ВАХ) кремниевых фотоумножителей с оптической изоляцией ячеек металлизированными канавками.

**Опытные образцы и методы.** Объектом исследований являлись опытные образцы малогабаритных SiФЭУ, изготовленные в ОАО «Интеграл». Размеры кристаллов SiФЭУ составляли  $S_{\text{кр}} = 1,44 \times 1,44$  мм<sup>2</sup> со светочувствительной площадью  $1 \times 1$  мм<sup>2</sup> и размером одного пиксе-

ля  $35 \times 35$  мкм<sup>2</sup> (всего 1004 пикселей). Пиксели представляют собой диодные  $n^+p-p^+$ -структуры, изготовленные в эпитаксиальной пленке с удельным сопротивлением  $5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$  толщиной  $3 \text{ мкм}$   $p$ -типа (ЗКДБ5), выращенной на низкоомной подложке  $p$ -типа КДБ (0,007–0,020). Последовательно в цепи с каждым диодом выполнены гасящие резисторы, сопротивление которых определялось из наклона прямой ВАХ SiФЭУ и составляло порядка  $R_r = (1,7\text{--}1,9) \cdot 10^6 \text{ Ом}$  [2]. Фотоактивная поверхность диода покрыта слоями  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Si}_3\text{N}_4$  с целью получения просветляющего покрытия, обладающего минимальным коэффициентом отражения на длине волны  $\lambda \sim 450\text{--}550 \text{ нм}$ . Напряжение лавинного пробоя исследуемых SiФЭУ имело значение  $U_{br} = 34 \pm 1,0 \text{ В}$ .

Конструктивной особенностью исследуемых образцов SiФЭУ является наличие оптической экранировки ячеек друг от друга с помощью разделительных металлизированных канавок в виде решетки для устранения паразитного оптического взаимодействия. Канавки U-типа шириной  $1,4 \text{ мкм}$  и глубиной до  $3,5\text{--}4,0 \text{ мкм}$  формировались ионно-плазменным реактивным травлением кремния в хлорсодержащей среде. Стенки получаемой канавки покрывались слоями  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Si}_3\text{N}_4$  суммарной толщиной  $0,15 \text{ мкм}$ . С целью оптической экранировки канавка заполнялась вольфрамом в процессе температурного разложения гексафторида вольфрама в среде с пониженным давлением. После химико-механической полировки металл оставался только в канавке и эффективно отражал фотоны. Исследовались SiФЭУ двух вариантов конструктивного исполнения. В первом варианте (ВІ) вывод металла канавки электрически соединялся через гасящий поликремниевый резистор с  $n^+$ -областью ячейки, во втором (ВІІ) – с  $p^+$ -областью. Кристаллы SiФЭУ помещались в стандартные корпуса ТО-1-2.

Облучение приборов гамма-квантами  $\text{Co}^{60}$  проводилось на гамма-установке «Исследователь» при температуре  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ . Мощность поглощенной дозы гамма-излучения составляла  $8 \text{ рад/с}$ , а полученная приборами доза –  $D = 10^4\text{--}10^6 \text{ рад}$ .

Образцы облучались в активном и пассивном электрических режимах. В активном режиме подавалось обратное смещение  $U_b$ , превышающее значение  $U_{br}$ . Испытания проводились при значениях превышающего напряжения  $\Delta U_b = U_b - U_{br} = 1, 3, 4, 5 \text{ В}$ . В процессе облучения в пассивном электрическом режиме все выводы образцов были короткозамкнуты.

Измерения обратной ВАХ образцов SiФЭУ проводились до и после облучения с помощью автоматизированного измерителя параметров полупроводниковых приборов ИППП-1/6 при нормальных условиях в темноте.

**Результаты экспериментов.** Обратные ВАХ образца SiФЭУ (ВІ) до и после воздействия гамма-излучения  $\text{Co}^{60}$  в активном электрическом режиме представлены в двойном логарифмическом масштабе на рис. 1, а. На характеристике необлученного образца можно выделить 3 участка. Первый наблюдается при увеличении обратного смещения до  $6\text{--}7 \text{ В}$  и соответствует неполному обеднению  $p$ -области диодных структур. При  $U_b = 6\text{--}7 \text{ В}$  ширина ОПЗ в приближении резкого несимметричного  $n^+p$ -перехода составляет  $1,3\text{--}1,4 \text{ мкм}$  [23], что вполне соответствует толщине  $p$ -области диодных  $n^+p-p^+$ -структур в исследуемых SiФЭУ. Второй участок на обратной ВАХ наблюдается при  $U_b = 6\text{--}34,2 \text{ В}$  и соответствует полному обеднению  $p$ -области, а третий – при значениях обратного смещения выше напряжения пробоя SiФЭУ  $U_{br} = 34,2 \text{ В}$ . На первом участке ВАХ необлученного образца обратный ток зависит от напряжения в виде  $I \sim U_b^n$  со значением показателя степени  $n = 0,8\text{--}0,9$ . На втором и третьем участках наклон ВАХ увеличивается с ростом  $U_b$ .

Облучение образца практически не влияет на характер зависимости  $I(U_b)$  на участках ВАХ, соответствующих неполному обеднению  $p$ -области ячеек и лавинного пробоя (см. рис. 1, а). С ростом поглощенной дозы до  $D = 1 \cdot 10^5 \text{ рад}$  темновой ток на первом участке увеличился в 2 раза, а также при  $D \geq 7 \cdot 10^4 \text{ рад}$  значение показателя степени  $n$  уменьшилось до  $0,7$ . Значительных изменений лавинного тока в результате облучения не происходит. На втором участке, соответствующем полному обеднению, с ростом  $D$  усиливается зависимость  $I(U_b)$ , а также существенно увеличивается значение темнового тока. Так, после  $D = 1 \cdot 10^5 \text{ рад}$  значение  $I$  при  $U_b = 30 \text{ В}$  возросло по сравнению с необлученным образцом в  $10^4$  раз.

На рис. 1, б приведены в логарифмическом масштабе обратные ВАХ образца SiФЭУ (ВІ) до и после воздействия гамма-излучения в пассивном электрическом режиме. Характер зависимости  $I(U_b)$  необлученного образца такой же, как и рассмотренный выше на рис. 1, а. С ростом

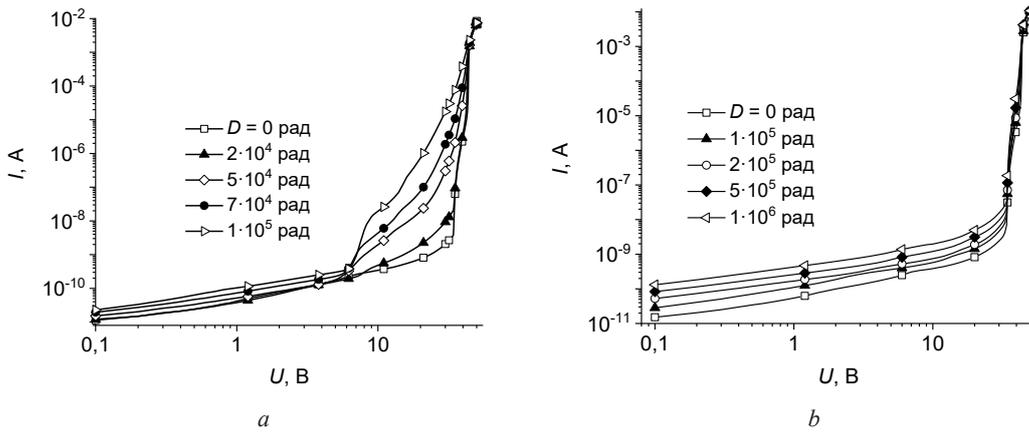


Рис. 1. Обратные вольт-амперные характеристики образцов SiФЭУ (BI) до и после облучения гамма-квантами  $Co^{60}$  при значениях обратного смещения  $U_b = 37,2$  (a) и 0 (b) В

Fig. 1. Reverse current-voltage characteristics of SiPM samples (BI) before and after irradiation with  $Co^{60}$  gamma-quanta at reverse bias values  $U_b = 37,2$  (a) and 0 (b) V

поглощенной дозы до  $D = 1 \cdot 10^6$  рад наблюдается монотонное увеличение темнового тока. Как и в случае активного режима облучения на первом участке ВАХ ( $U_b = 0-6$  В), вид зависимости  $I(U_b)$  изменяется весьма незначительно. Двукратное увеличение тока здесь также достигается при  $D = 1 \cdot 10^5$  рад, а значение показателя степени  $n$  снижается до 0,6 при  $D \geq 2 \cdot 10^5$  рад. На втором участке ( $U_b = 6-34$  В) вид зависимости  $I(U_b)$  не изменяется. После  $D = 1 \cdot 10^6$  рад значение  $I$  при  $U_b = 30$  В возросло в 6,4 раза (см. рис. 1, b).

На рис. 2 показаны дозовые зависимости обратных токов на трех участках ВАХ образцов SiФЭУ (BI), облучаемых в различных электрических режимах. Образцы облучались при значениях превышающего напряжения  $\Delta U_b = 1, 3, 4, 5$  В, а также при  $U_b = 0$  В. Значения обратных токов при  $U_b = 5$  В не превышают  $10^{-9}$  А. Здесь электрический режим облучения не влияет на вид полученных кривых  $I(D)$ .

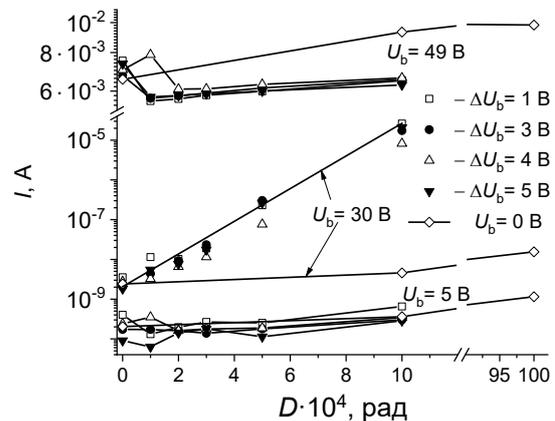
Значения обратных токов при  $U_b = 30$  В изменяются в диапазонах  $10^{-9}-10^{-5}$  и  $10^{-9}-2 \cdot 10^{-8}$  А в результате облучения образцов в активном и пассивном режимах соответственно. Все экспериментальные точки, соответствующие облучаемым в активном электрическом режиме образцам, можно аппроксимировать в диапазоне доз до  $D = 1 \cdot 10^5$  рад зависимостью

$$I = I_0 \exp(k \cdot D) \tag{1}$$

со значениями начального тока  $I_0 = 2,0$  нА и коэффициента радиационного изменения темнового тока  $k = 9,47 \cdot 10^{-5}$  рад $^{-1}$ . Прямая линия на графике проведена через указанные экспериментальные точки в соответствии с зависимостью (1). Кривая  $I(D)$  образца, облученного в пассивном электрическом режиме ( $U_b = 0$  В), имеет практически такой же вид, как и измеренная при  $U_b = 5$  В.

Рис. 2. Зависимости  $I(D)$ , измеренные при значениях обратного смещения  $U_b = 5, 30, 49$  В, образцов SiФЭУ (BI), облученных в различных электрических режимах

Fig. 2. Dependencies of  $I(D)$ , measured at reverse bias values  $U_b = 5, 30, 49$  V, of SiPM samples (BI) irradiated in different electrical modes



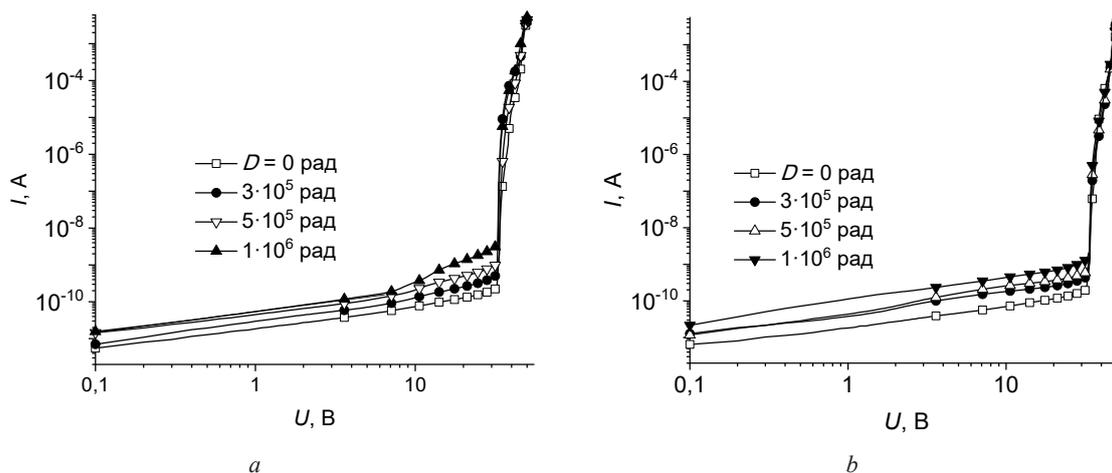


Рис. 3. Обратные вольт-амперные характеристики образцов SiФЭУ (BII) до и после облучения гамма-квантами  $\text{Co}^{60}$  при значениях обратного смещения  $U_b = 38,4$  (a) и 0 (b) В

Fig. 3. Reverse current-voltage characteristics of SiPM samples (BII) before and after irradiation with  $\text{Co}^{60}$  gamma-quanta at reverse bias values  $U_b = 38,4$  (a) and 0 (b) V

Зависимости  $I(D)$ , измеренные в режиме лавинного пробоя образцов при  $U_b = 49$  В, расположены на графике при  $I > 5,4 \cdot 10^{-3}$  А (см. рис. 2). Лавинный ток образца, облучаемого в пассивном электрическом режиме, монотонно увеличивается с ростом поглощенной дозы. В активном режиме облучения значение  $I$  с ростом  $D$  на начальном этапе облучения уменьшается на 20–25 %, а затем монотонно увеличивается. Отметим, что такие изменения лавинного тока в результате облучения образцов при всех значениях превышающего напряжения не коррелируют с экспоненциальным ростом темнового тока при  $U_b = 30$  В. Этот факт позволяет заключить, что не все носители заряда, за счет которых возрастает темновой ток в результате облучения, участвуют в процессе лавинного умножения.

Обратные ВАХ образца SiФЭУ (BII) до и после воздействия гамма-излучения  $\text{Co}^{60}$  в активном электрическом режиме представлены на рис. 3, a. Аналогично образцам SiФЭУ (BI), на характеристике имеются участки неполного ( $U_b = 0–6$  В) и полного (6–33,4 В) обеднения  $p$ -области ячеек, а также лавинного пробоя при  $U_b > 33,4$  В. У необлученного образца на первом участке ток зависит от напряжения в виде  $I \sim U_b^{0,6}$ . С ростом поглощенной дозы темновой ток монотонно увеличивается. На первом участке ВАХ меняется значение показателя степени  $n$ . При  $D = 1 \cdot 10^6$  рад  $n = 0,7$ . На втором участке характеристики ( $U_b = 6–35$  В) усиливается вид зависимости  $I(D)$ .

Характеристики образца SiФЭУ (BII), облучаемого в пассивном электрическом режиме, приведены на (рис. 3, b). Сравним полученные результаты, представленные на рис. 3, b и 1, b. Видно, что обратные ВАХ образцов SiФЭУ (BII) и (BI) после воздействия гамма-излучения практически не отличаются друг от друга. Это позволяет предположить, что в пассивном электрическом режиме облучения конструкция приборов не влияет на характер зависимости темновых токов от поглощенной дозы.

На рис. 4 показаны дозовые зависимости темновых токов на трех участках ВАХ образцов SiФЭУ (BII), облучаемых в различных электрических режимах:  $\Delta U_b = 1, 3, 4, 5$  В, а также при  $U_b = 0$  В. В целом ток при всех значениях  $\Delta U_b$  увеличивается с ростом  $D$ . Так, при  $U_b = 5$  В начальные значения тока не превышают 0,05 нА, а после поглощенной дозы  $D = 1 \cdot 10^6$  рад – 0,3 нА. Темновой ток при  $U_b = 30$  В возрос при активном режиме облучения в 15–16 раз, а при пассивном – 6,5 раза. Лавинный ток при  $U_b = 49$  В увеличился в диапазоне доз  $D = (0,1–1) \cdot 10^6$  рад в 1,5–2 раза. При этом на начальном этапе облучения ( $D = 1 \cdot 10^5$  рад) в активном режиме наблюдается как увеличение, так и уменьшение значения  $I$ . В целом зависимости  $I(D)$  образца, облучаемого в пассивном режиме, имеют похожий вид, как и у образца SiФЭУ (BI).

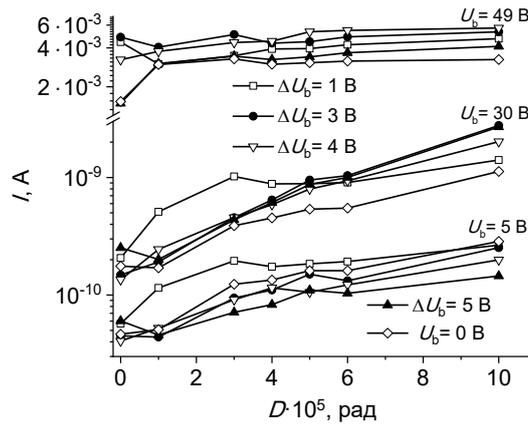


Рис. 4. Зависимости  $I(D)$ , измеренные при значениях обратного смещения  $U_b = 5, 30, 49$  В, образцов SiФЭУ (ВІІ), облученных в различных электрических режимах

Fig. 4. Dependencies  $I(D)$ , measured at reverse bias values  $U_b = 5, 30, 49$  V, of SiPM (BII) samples irradiated in different electrical modes

Каждая ячейка исследуемых в работе SiФЭУ (ВІ) и (ВІІ) представляет собой диодную  $n^+p-p^+$ -структуру, окруженную с боковых сторон слоями  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . Конструктивное исполнение образцов позволяет заключить, что темновой ток определяется генерационной  $I_g$ , диффузионной  $I_d$  и поверхностной  $I_p$  составляющими [23, 24]. Генерационная составляющая обусловлена генерацией электронно-дырочных пар в ОПЗ  $p-n$ -перехода в результате теплового возбуждения. Она зависит от толщины области пространственного заряда и для резкого несимметричного перехода  $I_g \sim U_b^{0.5}$ . Диффузионная составляющая связана с диффузией носителей заряда из прилегающих к ОПЗ областей и прямо пропорциональна обратному смещению  $I_d \sim U_b$  [23]. Поверхностная составляющая определяется площадью поверхности ОПЗ, граничащей со слоем  $\text{SiO}_2$ , а также плотностью поверхностных состояний. Площадь поверхности прямо пропорциональна толщине ОПЗ, т. е. при однородном распределении поверхностных состояний  $I_p \sim U_b^{0.5}$ . На участке неполного обеднения ВАХ необлученных SiФЭУ преобладают генерационная и диффузионная составляющие (см. рис. 1 и 3). На втором участке ВАХ, соответствующем полному обеднению, граница ОПЗ достигает  $p^+$ -области и ее положение весьма незначительно меняется с дальнейшим ростом  $U_b$ . Количество электронов, диффундирующих из прилегающей к ОПЗ  $p^+$ -области, сокращается в результате уменьшения диффузионной длины [24, 25]. В этом случае увеличение обратного тока вызвано усиленной электрическим полем термической генерацией электронно-дырочных пар в объеме и на поверхности ОПЗ [26].

Из всех трех составляющих именно генерационная и диффузионная вносят основной вклад в лавинное умножение носителей заряда, т. е. в величину лавинного тока [2]. Подвижность электронов и дырок у поверхности меньше подвижности в объеме [23, 26]. Лавинное умножение носителей заряда у поверхности возможно при большей напряженности электрического поля, чем в объеме.

Взаимодействие гамма-квантов с материалом образцов SiФЭУ сопровождается ионизацией атомов и образованием структурных нарушений [25]. Структурные нарушения в объеме  $n^+p-p^+$ -структур являются центрами генерации–рекомбинации подвижных носителей заряда. Увеличение концентрации таких центров с ростом поглощенной дозы ведет к усилению генерационной составляющей обратного тока [24, 25], что и наблюдается в радиационных изменениях ВАХ на участке неполного обеднения (см. рис. 1–4). С ростом  $D$  диффузионная составляющая становится меньше, так как уменьшается диффузионная длина неосновных носителей заряда во всех областях диодных  $n^+p-p^+$ -структур. Следует отметить, что концентрация введенных облучением структурных нарушений в исследуемом диапазоне доз весьма небольшая [24, 25].

В процессе облучения образцов также идет накопление положительного заряда в объеме слоев  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Si}_3\text{N}_4$  и рост плотности поверхностных состояний на границе  $\text{Si}/\text{SiO}_2$  [24]. Часть сгене-

рированных облучением в слоях  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Si}_3\text{N}_4$  электронно-дырочных пар рекомбинирует, а оставшиеся пары разделяются. В силу высокой подвижности электроны в течение очень короткого времени покидают диэлектрик. Дырки из-за более низкой подвижности захватываются ловушками с образованием положительного заряда. Вблизи границы  $\text{Si}/\text{SiO}_2$  могут высвободиться ионы водорода с образованием поверхностных ловушек. Увеличение плотности поверхностных состояний ведет к росту поверхностной составляющей обратного тока [23, 24]. Часть электронно-дырочных пар, избежавших рекомбинации, принято называть электронно-дырочным выходом. Величина электронно-дырочного выхода максимальна при наличии электрических полей и незначительна при их отсутствии [17, 24].

При облучении в активном режиме образцов SiФЭУ (BI) на контакты металла канавки и слоя  $n^+$ -Si подается одно и то же значение положительного потенциала источника питания, а на контакт  $p^+$ -слоя – отрицательное значение. В изолирующих слоях разделительных канавок возникает электрическое поле, под действием сил которого возрастает выход электронно-дырочных пар [17, 24]. Накопленный в объеме диэлектрика положительный заряд  $Q_{\text{от}}$  усиливает напряженность электрического поля вблизи границы раздела  $\text{Si}/\text{SiO}_2$ . В [17] показано, что максимальное значение  $Q_{\text{от}}$  для SiФЭУ (BI) достигается в области слоя  $\text{SiO}_2$ , граничащей с  $p$ - $p^+$ -переходом. В данном месте облученных  $n^+$ - $p$ - $p^+$ -диодных структур при измерении ВАХ возможно образование инверсного слоя электронной проводимости [26]. Приток электронов в инверсный слой с увеличением обратного смещения осуществляется через внешнюю цепь.

С увеличением обратного смещения, приложенного к SiФЭУ (BI), зоны кремния в каждой ячейке вблизи поверхности  $\text{SiO}_2$  искривляются вниз [26]. Началом инверсии является совпадение квазиуровня Ферми для электронов  $E_{\text{Fn}}$  с серединой запрещенной зоны  $E_i$  кремния на границе с оксидом. У необлученных образцов инверсия не возникает, так как потенциалы металла канавки и  $n^+$ -слоя совпадают [26, 27]. Однако накопленный в результате облучения положительный заряд  $Q_{\text{от}}$  в  $\text{SiO}_2$  создает дополнительный поверхностный потенциал и увеличивает искривление зон кремния. При определенном значении поглощенной дозы образуется инверсный слой вблизи поверхности оксида. Величина  $Q_{\text{от}}$  зависит от поглощенной дозы следующим образом [28]:

$$Q_{\text{от}} = qDg_0d_{\text{ок}}f_t, \quad (2)$$

где  $q$  – заряд электрона,  $g_0$  – скорость генерации электронно-дырочных пар в диэлектрике на 1 рад поглощенной энергии гамма-квантов,  $d_{\text{ок}}$  – толщина диэлектрика,  $f_t$  – доля дырок, захваченных на уровне ловушек. На начальном этапе облучения значение  $f_t$  можно считать постоянным, и величина  $Q_{\text{от}}$  прямо пропорционально зависит от  $D$  [28, 29]. В соответствии с зависимостью  $Q_{\text{от}}(D)$  меняется положение  $E_{\text{Fn}}$  в запрещенной зоне кремния на границе с  $\text{SiO}_2$ . Значение обратного тока определяется концентрацией электронов в инверсном слое, которая экспоненциально зависит от величины  $E_{\text{Fn}} - E_i$ . Поэтому в эксперименте наблюдаются экспоненциальные зависимости  $I(D)$ , измеренные при  $U_b = 30$  В (см. рис. 2).

Помимо заряда  $Q_{\text{от}}$  в объеме  $\text{SiO}_2$  образуется еще и заряд поверхностных состояний  $Q_{\text{ит}}$  на границе  $\text{Si}/\text{SiO}_2$ . Зависимость  $Q_{\text{ит}}(D)$  описывается степенной функцией с показателем степени  $2/3$  в диапазоне доз до  $2 \cdot 10^7$  рад [28, 30]. В нашем случае образцы SiФЭУ (BI) облучались в активном режиме до максимального значения поглощенной дозы, равного  $10^5$  рад. Согласно результатам экспериментальных исследований, приведенных в работе [30], зависимость  $Q_{\text{ит}}(D)$  в исследуемом нами диапазоне доз также можно считать линейной. В режиме инверсии донорные уровни поверхностных состояний будут в нейтральном зарядовом состоянии, а акцепторные – в отрицательном. Отрицательный заряд  $Q_{\text{ит}}$  будет уменьшать влияние заряда  $Q_{\text{от}}$  при измерении ВАХ и облучении образцов в режиме лавинного пробоя.

Наблюдаемая в эксперименте зависимость лавинного тока от поглощенной дозы для образцов SiФЭУ (BI), вероятнее всего, связана с изменением сопротивления гасящих резисторов ячеек. Из измерений прямых ВАХ облученных образцов было установлено, что на начальном этапе облучения значение  $R_r$  вначале возрастало на 20 %, а затем монотонно уменьшалось.

Отметим, что для пассивации канавок исследуемых образцов SiФЭУ использовался двухслойный диэлектрик  $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ . На границе этих диэлектриков концентрация ловушечных цен-

тров составляет до  $10^{20} \text{ см}^{-3}$  [30]. Однако наибольший эффект дает положительный заряд, накапливаемый в слое  $\text{SiO}_2$ , так как он расположен ближе к поверхности кремния.

В процессе облучения образцов SiФЭУ (ВІІ) в режиме лавинного пробоя к контактам металла канавки и слоя  $p^+$ -Si прикладывается отрицательный потенциал источника питания. При данной конфигурации напряженности электрического поля в диэлектрике скорость накопления зарядов  $Q_{\text{от}}$  и  $Q_{\text{ит}}$  в результате облучения не столь эффективна, как для SiФЭУ (ВІ) [17]. Это подтверждается полученными экспериментальными данными (см. рис. 3 и 4).

**Выводы.** Исследовано влияние гамма-квантов  $\text{Co}^{60}$  на обратную вольт-амперную характеристику кремниевых фотоэлектронных умножителей (SiФЭУ) с 1004 ячейками, представляющими собой оптически изолированные друг от друга  $n^+p-p^+$ -структуры. Оптическая изоляция ячеек осуществлялась канавками, которые после пассивации стенок слоями  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Si}_3\text{N}_4$  заполнялись вольфрамом. Исследовались SiФЭУ двух вариантов конструктивного исполнения. В первом варианте (ВІ) вывод металла канавки электрически соединялся через гасящий поликремниевый резистор с  $n^+$ -областью ячейки, во втором (ВІІ) – с  $p^+$ -областью. Напряжение пробоя исследуемых SiФЭУ составляло  $U_{\text{бр}} = 34 \pm 1,0 \text{ В}$ . Образцы облучались в режиме лавинного пробоя при значениях перенапряжения  $\Delta U_{\text{б}} = 1\text{--}5 \text{ В}$  (активный электрический режим) и при обратном смещении  $U_{\text{б}} = 0 \text{ В}$  (пассивный режим).

Показано, что на характеристиках SiФЭУ имеются 3 участка: неполного ( $U_{\text{б}} = 0\text{--}7 \text{ В}$ ) и полного ( $7\text{--}34 \text{ В}$ ) обеднения  $p$ -области  $n^+p-p^+$ -структур, а также участок лавинного пробоя ( $U_{\text{б}} > 34 \text{ В}$ ). На участке неполного обеднения значения темнового тока при  $U_{\text{б}} = 5 \text{ В}$  монотонно возрастают в 2 раза у SiФЭУ (ВІ) при  $D = 10^5 \text{ рад}$  и в 6 раз у SiФЭУ (ВІІ) при  $D = 10^6 \text{ рад}$ . При этом изменения вида ВАХ не зависят от электрического режима облучения и конструктивных особенностей образцов. На участке полного обеднения при  $U_{\text{б}} = 30 \text{ В}$  и  $D = 10^6 \text{ рад}$  темновой ток возрастает в 6–7 раз у SiФЭУ (ВІ) и (ВІІ), облучаемых в пассивном режиме, и в 15–16 раз у SiФЭУ (ВІІ), облучаемых в активном режиме. Наиболее сильная деградация характеристики на втором участке наблюдается для SiФЭУ (ВІ), облучаемых в режиме лавинного пробоя. При  $D = 10^5 \text{ рад}$  значение темнового тока возрастает на 4 порядка. Показано, что при всех значениях  $\Delta U_{\text{б}}$  зависимость темнового тока от  $D$  при  $U_{\text{б}} = 30 \text{ В}$  можно аппроксимировать выражением

$$I = I_0 \exp(k \cdot D),$$

где  $I_0 = 2,0 \text{ нА}$ ,  $k = 9,47 \cdot 10^{-5} \text{ рад}^{-1}$ .

Увеличение лавинного тока при  $D = 10^6 \text{ рад}$  составило 1,5–2 раза для всех образцов в пассивном режиме облучения и SiФЭУ (ВІІ) в активном режиме. Для SiФЭУ (ВІ) в активном режиме облучения значение лавинного тока с ростом  $D$  на начальном этапе облучения уменьшается на 20–25 %, а потом монотонно увеличивается.

Зависимости темнового тока исследуемых SiФЭУ от поглощенной дозы обусловлены увеличением генерационной и поверхностной составляющих. Экспоненциальные зависимости  $I(D)$  для SiФЭУ (ВІ), облучаемых в активном режиме, вызваны соответствующими зависимостями концентрации инверсных электронов вблизи границы раздела  $\text{Si}/\text{SiO}_2$  ячеек от поверхностного потенциала, создаваемого положительным накопленным зарядом в объеме оксида.

**Благодарности.** Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант № Т23МЭ-024).

**Acknowledgements.** This work was supported by Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (grant no. T23ME-024).

### Список использованных источников

1. Гулаков, И. Р. Фотоприемники квантовых систем / И. Р. Гулаков, А. О. Зеневич. – Минск: УО ВГКС, 2012. – 276 с.
2. Dinu, N. Silicon photomultipliers (SiPM) / N. Dinu // Photodetectors: Materials, Devices and Applications. – Elsevier, 2016. – P. 255–294. <https://doi.org/10.1016/b978-1-78242-445-1.00008-7>
3. Silicon photomultiplier and its possible applications / P. Buzhan [et al.] // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. – 2003. – Vol. 504, № 1–3. – P. 48–52. [https://doi.org/10.1016/s0168-9002\(03\)00749-6](https://doi.org/10.1016/s0168-9002(03)00749-6)
4. Lecoq, P. SiPM applications in positron emission tomography: toward ultimate PET time-of-flight resolution / P. Lecoq, S. Gundacker // Eur. Phys. J. Plus. – 2021. – Vol. 136, № 3. – Art. ID 292. <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-021-01183-8>

5. A short wavelength GigaHertz clocked fiber-optic quantum key distribution system / K. J. Gordon [et al.] // IEEE J. Quantum Electron. – 2004. – Vol. 40, № 7. – P. 900–908. <https://doi.org/10.1109/jqe.2004.830182>
6. Lidar with SiPM: Some capabilities and limitations in real environment / R. Agishev [et al.] // Optics & Laser Technology. – 2013. – Vol. 49. – P. 86–90. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2012.12.024>
7. Silicon Photomultipliers and SPAD imagers in biophotonics: Advances and perspectives / M. Caccia [et al.] // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. – 2019. – Vol. 926. – P. 101–117. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.10.204>
8. Optical crosstalk in SiPMs / M. R. Hampel [et al.] // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. – 2020. – Vol. 976. – Art. ID 164262. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2020.164262>
9. The cross-talk problem in SiPMs and their use as light sensors for imaging atmospheric Cherenkov telescopes / E. Popova [et al.] // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. – 2009. – Vol. 610, № 1. – P. 131–134. <http://doi.org/10.1016%2Fj.nima.2009.05.150>
10. Optical crosstalk in single photon avalanche diode arrays: a new complete model / I. Rech [et al.] // Opt. Express. – 2008. – Vol. 16, № 12. – P. 8381–8394. <https://doi.org/10.1364/oe.16.008381>
11. Грехов, И. В. Лавинный пробой  $p$ - $n$ -перехода в полупроводниках / И. В. Грехов, Ю. Н. Сережкин. – Л.: Энергия, 1980. – 152 с.
12. Mirzoyan, R. Light emission in Si avalanches / R. Mirzoyan, R. Kosyra, H. G. Moser // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. – 2009. – Vol. 610, № 1. – P. 98–100. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2009.05.081>
13. On the bremsstrahlung origin of hot-carrier-induced photons in silicon devices / A. L. Lacaita [et al.] // IEEE Trans. Electron Devices. – 1993. – Vol. 40, № 3. – P. 577–582. <https://doi.org/10.1109/16.199363>
14. Optical crosstalk photon penetration depth in Silicon Photomultipliers / C. Zhang [et al.] // Optik. – 2021. – Vol. 239. – P. 166864. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2021.166864>
15. Kindt, W. J. Optical Cross Talk in Geiger Mode Avalanche Photodiode Arrays: Modeling, Prevention and Measurement / W. J. Kindt, H. W. van Zeijl, S. Middelhoek // 28<sup>th</sup> European Solid-State Device Research Conference. – Bordeaux, 1998. – P. 192–195.
16. Кремниевые фотоприемники с внутренним усилением широкого спектра применения / С. А. Сорока [и др.] // Приборостроение-2020: материалы 13-й Междунар. науч.-техн. конф., 18–20 нояб. 2020 г., Минск, Респ. Беларусь / редкол.: О. К. Гусев [и др.]. – Минск, 2020. – С. 393–394.
17. Огородников, Д. А. Моделирование накопления заряда в кремниевых фотоэлектронных умножителях под воздействием мягкого рентгеновского излучения / Д. А. Огородников // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук. – 2022. – Т. 58, № 3. – С. 337–343. <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2022-58-3-337-343>
18. Garutti, E. Characterization and X-Ray damage of Silicon Photomultipliers / E. Garutti // Proceedings of Technology and Instrumentation in Particle Physics 2014 – PoS(TIPP2014). – Amsterdam, 2014. <https://doi.org/10.22323/1.213.0070>
19. Garutti, E. Radiation Damage of SiPMs / E. Garutti, Yu. Musienko // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. – 2019. – Vol. 926. – P. 69–84. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.10.191>
20. Radiation hardness of silicon photomultipliers under  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ -ray irradiation / R. Pagano [et al.] // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. – 2014. – Vol. 767. – P. 347–352. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2014.08.028>
21. Nakamura, I. Radiation damage of pixilated photon detector by neutron irradiation / I. Nakamura // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. – 2009. – Vol. 610, № 1. – P. 110–113. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2009.05.086>
22. Engelmann, E. Dark Count Rate of Silicon Photomultipliers / E. Engelmann. – Cuvillier, 2018. – 194 p.
23. Sze, S. M. Semiconductor Devices: Physics and Technology / S. M. Sze, M.-K. Lee. – John Wiley & Sons Singapore Pte. Limited, 2012. – 582 p.
24. Коршунов, Ф. П. Радиационные эффекты в полупроводниковых приборах / Ф. П. Коршунов, Г. В. Гатальский, Г. М. Иванов. – Минск: Наука и техника, 1978. – 232 с.
25. Таперо, К. И. Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах космического применения / К. И. Таперо, В. Н. Улимов, А. М. Членов. – М.: БИНОМ, 2012. – 304 с.
26. Блихер, А. Физика силовых биполярных и полевых транзисторов: пер. с англ. / А. Блихер. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 248 с.
27. Grove, A. S. Physics and Technology of Semiconductor Devices / A. S. Grove. – Wiley, 1967. – 366 p.
28. Никифоров, А. Ю. Радиационные эффекты в КМОП ИС / А. Ю. Никифоров, В. А. Телец, А. И. Чумаков. – М.: Радио и связь, 1994. – 164 с.
29. Росадо, Л. Физическая электроника и микроэлектроника: пер. с исп. / Л. Росадо. – М.: Высш. шк., 1991. – 351 с.
30. Першенков, В. С. Поверхностные радиационные эффекты в элементах интегральных микросхем / В. С. Першенков, В. Д. Попов, А. В. Шальнов. – М.: Энергоатомиздат; 1988. – 256 с.

## References

1. Gulakov I. R., Zenevich A. O. *Photodetectors of Quantum Systems*. Minsk, Higher State College of Communications, 2012. 48 p. (in Russian).
2. Dinu N. Silicon photomultipliers (SiPM). *Photodetectors: Materials, Devices and Applications*. Elsevier, 2016, pp. 255–294. <https://doi.org/10.1016/b978-1-78242-445-1.00008-7>
3. Buzhan P., Dolgoshein B., Filatov L., Ilyin A., Kantzerov V., Kaplin V., Karakash A., Kayumov F., Klemin S., Popova E., Smirnov S. Silicon photomultiplier and its possible applications. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2003, vol. 504, no. 1–3, pp. 48–52. [https://doi.org/10.1016/s0168-9002\(03\)00749-6](https://doi.org/10.1016/s0168-9002(03)00749-6)

4. Lecoq P., Gundacker S. SiPM applications in positron emission tomography: toward ultimate PET time-of-flight resolution. *The European Physical Journal Plus*, 2021, vol. 136, no. 3, art. ID 292. <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-021-01183-8>
5. Gordon K. J., Fernandez V., Townsend P. D., Buller G. S. A short wavelength GigaHertz clocked fiber-optic quantum key distribution system. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2004, vol. 40, no. 7, pp. 900–908. <https://doi.org/10.1109/jqe.2004.830182>
6. Agishev R., Comerón A., Bach J., Rodriguez A., Sicard M., Riu J., Royo S. Lidar with SiPM: Some capabilities and limitations in real environment. *Optics & Laser Technology*, 2013, vol. 49, pp. 86–90. <https://doi.org/10.1016/j.optlas-tec.2012.12.024>
7. Caccia M., Nardo L., Santoro R., Schaffhauser D. Silicon Photomultipliers and SPAD imagers in biophotonics: Advances and perspectives. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2019, vol. 926, pp. 101–117. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.10.204>
8. Hampel M. R., Fuster A., Varela C., Platino M., Almela A., Lucero A., Wundheiler B., Etchegoyen A. Optical cross-talk in SiPMs. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2020, vol. 976, art. ID 164262. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2020.164262>
9. Popova E., Buzhan P., Dolgoshein B., Ilyin A., Kaplin V., Klemin S., Mirzoyan R., Teshima M. The cross-talk problem in SiPMs and their use as light sensors for imaging atmospheric Cherenkov telescopes. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2009, vol. 610, no. 1, pp. 131–134. <http://doi.org/10.1016%2Fj.nima.2009.05.150>
10. Rech I., Ingarciola A., Spinelli R., Labanca I., Marangoni S., Ghioni M., Cova S. Optical crosstalk in single photon avalanche diode arrays: a new complete model. *Optics Express*, 2008, vol. 16, no. 12, pp. 8381–8394. <https://doi.org/10.1364/oe.16.008381>
11. Grekhov I. V., Serezhkin Yu. N. *Avalanche breakdown of p-n junction in semiconductors*. Leningrad, Energiya Publ., 1980. 152 p. (in Russian).
12. Mirzoyan R., Kosyra R., Moser H. G. Light emission in Si avalanches. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2009, vol. 610, no. 1, pp. 98–100. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2009.05.081>
13. Lacaíta A. L., Zappa F., Bigliardi S., Manfredi M. On the bremsstrahlung origin of hot-carrier-induced photons in silicon devices. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1993, vol. 40, no. 3, pp. 577–582. <https://doi.org/10.1109/16.199363>
14. Zhang C., Zhang G., Cao X., Zhang C., Li L. Optical crosstalk photon penetration depth in Silicon Photomultipliers. *Optik*, 2021, vol. 239, pp. 166864. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2021.166864>
15. Kindt W. J., Zeijl H. W. van, Middelhoek S. Optical Cross Talk in Geiger Mode Avalanche Photodiode Arrays: Modeling, Prevention and Measurement. *28<sup>th</sup> European Solid-State Device Research Conference*. Bordeaux, France, 1998, pp. 192–195.
16. Soroka S. A., Zalesskii V. B., Malyutina-Bronskaya V. V., Lemeshevskaya A. M., Solodukha V. V. Silicon photodetectors with internal amplification of a wide range of applications. *Priborostroenie-2020: materialy 13-i Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii, 18–20 noyabrya 2020 goda, Minsk, Respublika Belarus'* [Proceedings of the 13<sup>th</sup> International Scientific and Technical Conference, November 18–20, 2020, Minsk, Republic of Belarus]. Minsk, 2020, pp. 393–394 (in Russian).
17. Aharodnikau D. A. Simulation of charge accumulation in silicon photomultipliers under the influence of soft X-rays. *Vesti Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-matematychnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physics and Mathematics series*, 2022, vol. 58, no. 3, pp. 337–343 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2022-58-3-337-343>
18. Garutti E. Characterization and X-Ray damage of Silicon Photomultipliers. *Proceedings of Technology and Instrumentation in Particle Physics 2014 – PoS(TIPP2014)*. Amsterdam, 2014. <https://doi.org/10.22323/1.213.0070>
19. Garutti E., Musienko Yu. Radiation damage of SiPMs. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2019, vol. 926, pp. 69–84. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.10.191>
20. Pagano R., Lombardo S., Palumbo F., Sanfilippo D., Valvo G., Fallica G., Libertino S. Radiation hardness of silicon photomultipliers under <sup>60</sup>Co  $\gamma$ -ray irradiation. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2014, vol. 767, pp. 347–352. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2014.08.028>
21. Nakamura I. Radiation damage of pixilated photon detector by neutron irradiation. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2009, vol. 610, no. 1, pp. 110–113. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2009.05.086>
22. Engelmann E. *Dark Count Rate of Silicon Photomultipliers*. Cuvillier, 2018. 194 p.
23. Sze S. M., Lee M.-K. *Semiconductor Devices: Physics and Technology*. John Wiley & Sons Singapore Pte. Limited, 2012. 582 p.
24. Korshunov F. P., Gatal'skii G. V., Ivanov G. M. *Radiation Effects in Semiconductor Devices*. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1978. 232 p. (in Russian).
25. Tapero K. I., Ulimov V. N., Chlenov A. M. *Radiation Effects in Silicon Integrated Circuits for Space Applications*. Moscow, BINOM Publ., 2012. 304 p. (in Russian).
26. Blicher A. *Field-Effect and Bipolar Power Transistor Physics*. Academic Press, 1981. 312 p.
27. Grove A. S. *Physics and Technology of Semiconductor Devices*. Wiley, 1967. 366 p.

28. Nikiforov A. Yu., Telets V. A., Chumakov A. I. *Radiation Effects in CMOS IC*. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1994. 164 p. (in Russian).

29. Rosado L. *Electrónica Física y Microelectrónica*. Madrid, Paraninfo, 1987. 501 p. (in Spanish).

30. Pershenkov V. S., Popov V. D., Shal'nov A. V. *Surface Radiation Effects in Integrated Circuit Elements*. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1988. 256 p. (in Russian).

### Информация об авторах

**Огородников Дмитрий Александрович** – научный сотрудник, Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровки, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: dimaogorodnikov@gmail.com

**Ластовский Станислав Брониславович** – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровки, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: lastov@physics.by

**Богатырев Юрий Владимирович** – доктор технических наук, главный научный сотрудник, Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровки, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: bogat@physics.by

**Цымбал Владимир Сергеевич** – главный конструктор направления, Филиал НТЦ «Белмикросистемы», ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» (ул. Казинца, 121А, 220108, Минск, Республика Беларусь). E-mail: VTsymbal@integral.by

**Лемешевская Алла Михайловна** – заместитель начальника отдела, Филиал НТЦ «Белмикросистемы», ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» (ул. Казинца, 121А, 220108, Минск, Республика Беларусь). E-mail: lem55@mail.ru

**Шпаковский Сергей Васильевич** – начальник отделения «Т», Филиал НТЦ «Белмикросистемы», ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» (ул. Казинца, 121А, г. Минск, 220108, Республика Беларусь). E-mail: SShpakovskiy@integral.by

### Information about the authors

**Dzmitryi A. Aharodnikau** – Researcher, Scientific-Practical Materials Research Centre of the National Academy of Sciences of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: dimaogorodnikov@gmail.com

**Stanislav B. Lastovskii** – Ph. D. (Physics and Mathematics), Leading Researcher, Scientific-Practical Materials Research Centre of the National Academy of Sciences of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: lastov@physics.by

**Yuri V. Bogatyrev** – Dr. Sc. (Engineering), Chief Researcher, Scientific-Practical Materials Research Centre of the National Academy of Sciences of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: bogat@physics.by

**Uladzimir S. Tsymbal** – Chief Designer of Concept, Affiliate R&D Center “Belmicrosystems” of JSC “INTEGRAL” – “INTEGRAL” Holding Managing Company (121A, Kazinets Str., 220108, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: VTsymbal@integral.by

**Alla M. Lemeshevskaya** – Department Deputy Manager, Affiliate R&D Center “Belmicrosystems” of JSC “INTEGRAL” – “INTEGRAL” Holding Managing Company (121A, Kazinets Str., 220108, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: lem55@mail.ru

**Sergey V. Shpakovski** – Head of the Department “Т”, Affiliate R&D Center “Belmicrosystems” of JSC “INTEGRAL” – “INTEGRAL” Holding Managing Company (121a, Kazinets Str., 220108, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: SShpakovskiy@integral.by