

ЭФФЕКТИВНАЯ ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНАЯ ПОВЕРХНОСТЬ
КРЕМНИЕВЫХ ФОТОУМНОЖИТЕЛЕЙ

И. Р. Гулаков, А. О. ЗЕНЕВИЧ, О. В. КОЧЕРГИНА*

Белорусская государственная академия связи, Минск, Беларусь
*o.kochergina@bsac.by

Аннотация. Представлены результаты исследования по определению эффективной площади фоточувствительной поверхности кремниевых фотоумножителей (SiФЭУ) при рабочем напряжении питания, а также установлению зависимости этой характеристики от приложенного напряжения питания. Для проведения исследования выбраны кремниевые фотоумножители КОФ5-1035 (Беларусь), Ketek PM 3325 и ON Semi FC 30035 (Германия). Предложена экспериментальная установка, с помощью которой определено, что увеличение напряжения питания приводит к увеличению площади эффективной фоточувствительной поверхности SiФЭУ. Получено, что максимальное значение чувствительности при рабочем напряжении наблюдается в центральной части фоточувствительной поверхности и симметрично уменьшается при приближении пятна оптического зонда к краю этой поверхности. Полученные результаты могут быть применены при создании приборов для регистрации оптического излучения видимого диапазона на базе кремниевых фотоумножителей.

Ключевые слова: кремниевый фотоумножитель, фототок, чувствительность, неравномерность чувствительности, перенапряжение, эффективная фоточувствительная поверхность

Ссылка для цитирования: Гулаков И. Р., Зеневич А. О., Кочергина О. В. Эффективная фоточувствительная поверхность кремниевых фотоумножителей // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 11. С. 960—967. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-11-960-967.

EFFECTIVE PHOTOSENSITIVE SURFACE OF SILICON PHOTOMULTIPLIERS

I. R. Gulakov, A. O. Zenevich, O. V. Kochergina*

Belarusian State Academy of Communications, Minsk, Belarus
o.kochergina@bsac.by

Abstract. Research has been carried out to determine the effective area of the photosensitive surface of silicon photomultipliers (SiPM) at the operating supply voltage, as well as to establish the dependence of this characteristic on the applied supply voltage. Silicon photomultipliers KOF5-1035 (Belarus), Ketek RM 3325 and ON Semi FC 30035 (Germany) are selected for the study. Application of developed experimental setup makes it possible to reveal that an increase in the supply voltage leads to an increase in the area of the effective photosensitive surface of the SiPM. It is found that the maximum value of sensitivity at a given operating voltage is observed in the central part of the photosensitive surface and decreases symmetrically as the spot of the optical probe approaches the surface edge. The results obtained can be used to create devices for detecting optical radiation in the visible range based on silicon photomultipliers.

Keywords: silicon photomultiplier, photocurrent, sensitivity, sensitivity heterogeneity, overvoltage, effective photosensitive surface

For citation: Gulakov I. R., Zenevich A. O., Kochergina O. V. Effective photosensitive surface of silicon photomultipliers. *Journal of Instrument Engineering*. 2023. Vol. 66, N 11. P. 960—967 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-11-960-967.

Введение. Для решения ряда научных и технических задач требуется регистрация сверхслабых световых потоков. В последние годы для этого используются кремниевые многоэлементные лавинные фотоприемники — кремниевые фотоумножители (SiФЭУ) [1—3], имеющие ряд преимуществ перед другими фотоприемниками [4, 5]. Так, по сравнению с электровакуумными фотоэлектронными умножителями кремниевые фотоумножители более компактны, нечувствительны к магнитным полям, имеют высокую механическую прочность и лучшую чувствительность к видимой области спектра, также для работы SiФЭУ необходимы меньшие напряжения питания. По сравнению с одноэлементными лавинными фотоприемниками кремниевые фотоумножители обладают такими преимуществами, как более высокий коэффициент усиления и большая площадь фоточувствительной поверхности [6—10].

Однако на данный момент не все характеристики SiФЭУ изучены в полной мере. Одной из наиболее важных характеристик кремниевого фотоумножителя является эффективная площадь фоточувствительной поверхности. Знание этой характеристики важно при определении диаметра светового пятна, формируемого оптической системой на фоточувствительной поверхности кремниевого умножителя для обеспечения его максимальной чувствительности. В этой связи цель настоящей статьи — определение эффективной площади фоточувствительной поверхности кремниевого фотоумножителя при рабочем напряжении питания, а также установление зависимости этой характеристики от приложенного напряжения питания.

Экспериментальная установка и методика измерений. Для проведения исследований были выбраны кремниевые фотоумножители КОФ5-1035 (Беларусь), Ketek PM 3325 и ON Semi FC 30035 (Германия), имеющие схожую полупроводниковую структуру и параметры [11].

Исследования выполнялись на экспериментальной установке, структурная схема которой представлена на рис. 1, где И — источник оптического излучения, ОС — оптическая система, Б — блок питания, А — амперметр, В — вольтметр, Ф — кремниевый фотоумножитель, Д — дозиметр оптического излучения, З — полупрозрачное зеркало, Н — набор нейтральных светофильтров, О — диафрагма, R_n — сопротивление нагрузки, К — координатный столик, 1 и 2 — индикаторные микрометры.

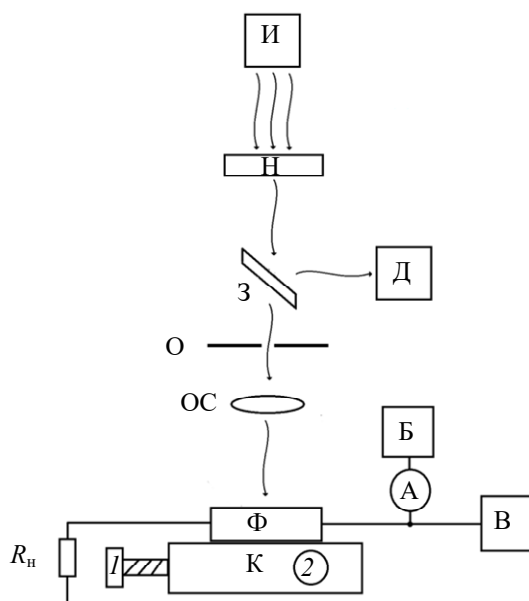


Рис. 1

Установка функционирует следующим образом. Источник оптического излучения И — полупроводниковый лазер с длиной волны 470 нм, соответствующей максимуму спектральной чувствительности кремниевых фотоумножителей [11], — направляет оптическое

излучение постоянной интенсивности на полупрозрачное зеркало З. При этом излучение проходит через набор нейтральных светофильтров Н, с помощью которого обеспечивается ослабление интенсивности оптического излучения в интервале от 10^{-5} до 10^{-10} Вт/см².

Полупрозрачное зеркало используется для разделения оптического излучения на два пучка равной интенсивности, один из которых подается на дозиметр оптического излучения Д марки ЛД-07, а второй через диафрагму О поступает в оптическую систему. Оптическая система формирует на фоточувствительной поверхности кремниевого фотоумножителя Ф световое пятно круглой формы оптического зонда. Площадь этого пятна не превышает 0,2 площади фоточувствительной поверхности SiФЭУ.

Кремниевый фотоумножитель располагается на координатном столике К. С помощью индикаторных микрометров 1 и 2 пятно оптического зонда можно перемещать в горизонтальной плоскости в двух направлениях, перпендикулярных друг другу. Блок питания Б позволяет регулировать напряжение питания $U_{\text{п}}$, для измерения которого используется вольтметр В. Последовательно с кремниевым фотоумножителем включено сопротивление нагрузки $R_{\text{н}} = 1$ кОм, используемое для ограничения тока, протекающего через SiФЭУ.

Измерения темнового тока $I_{\text{т}}$ SiФЭУ выполняются при закрытой диафрагме, в случае открытой диафрагмы регистрируется общий ток I . По значению фототока $I_{\text{ф}}$, вычисляемого как $I_{\text{ф}} = I - I_{\text{т}}$, и интенсивности оптического излучения J рассчитывается чувствительность SiФЭУ в каждой точке фоточувствительной поверхности [12]:

$$S = I_{\text{ф}}/J. \quad (1)$$

Интенсивность оптического излучения J выбиралась так, чтобы фототок при полном попадании светового пятна оптического зонда на фоточувствительную поверхность не менее чем в 100 раз превышал темновой ток и находился в пределах динамического диапазона исследуемых SiФЭУ (ГОСТ Р 59607-2021); значение интенсивности составляло $8 \cdot 10^{-8}$ Вт/см².

Неравномерность чувствительности фотоприемника определялась согласно методике, описанной в [13]. Испытуемый фотоприемник перемещают в заданном направлении, изменяя таким образом местонахождение светового пятна оптического зонда на его фоточувствительной поверхности. Далее определяют местонахождение светового пятна, при котором наблюдается максимальное значение фототока, после чего регистрируют координаты зонда и значение фототока. Затем последовательно перемещают фотоприемник в разные стороны от этого положения, измеряя фототок и фиксируя координаты светового пятна оптического зонда до достижения им края фоточувствительной поверхности фотоприемника.

В процессе исследования измерялась зависимость чувствительности S SiФЭУ от местонахождения светового пятна оптического зонда, по которой определялись среднее значение чувствительности $S_{\text{ср}}$ и величина $\Delta S = S_{\text{max}} - S_{\text{min}}$, где S_{max} и S_{min} — максимальная и минимальная чувствительности соответственно.

Неравномерность чувствительности δ SiФЭУ определялась по формуле

$$\delta = \Delta S/S_{\text{ср}}. \quad (2)$$

Эффективная площадь $A_{\text{эф}}$ для квадратной формы фоточувствительной поверхности определялась согласно выражению

$$A_{\text{эф}} = [(x_2 - x_1)(x'_2 - x'_1)], \quad (3)$$

где x_2 , x_1 и x'_1 , x'_2 — координаты перемещения координатного столика в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

Изменения местоположения светового пятна оптического зонда выполнялось по взаимно перпендикулярным осям симметрии фоточувствительной поверхности. При этом координаты

наты x_1 и x'_1 соответствуют точке положения пятна оптического зонда, для которого наблюдается максимальное значение чувствительности S_{\max} , а координаты x_2 и x'_2 — точке положения пятна оптического зонда, для которого значение чувствительности составляет $0,9S_{\max}$.

Шаг, с которым изменялось местонахождение светового пятна оптического зонда, подбирался таким, чтобы число точек измерения было не менее 10.

Исследуемые кремниевые умножители имеют различные напряжения лавинного пробоя $U_{\text{пр}}$. Поэтому для сравнительного анализа их характеристик применяется перенапряжение: $\Delta U = U_{\text{п}} - U_{\text{пр}}$. Исследования проводились для перенапряжений $\Delta U = -0,5 \dots 1,0$ В. При больших значениях ΔU происходит значительный рост темнового тока, что может привести к тепловому пробую SiФЭУ. Для меньших значений ΔU коэффициент усиления кремниевого умножителя близок к единице. Значение напряжения пробоя $U_{\text{пр}}$ устанавливалось по вольт-амперной характеристике SiФЭУ при закрытой диафрагме на основании методики [14]. Для исследуемых фотоприемников значения $U_{\text{пр}}$ следующие: ON Semi FC 30035 — 24,7 В, Ketek PM 3325 — 27,0 В и КОФ5-1035 — 30,0 В.

Измерения выполнялись при температуре $T = 293$ К. В процессе измерения неравномерности чувствительности поверхности кремниевого фотоумножителя выполнялись все требования по расходимости светового пятна оптического зонда и погрешности измерений, установленные стандартом [12].

Результаты измерений. Обсуждение. Зависимости чувствительности S от местонахождения светового пятна оптического зонда на фоточувствительной поверхности для исследуемых SiФЭУ показаны на рис. 2. Зависимости получены для перенапряжения $\Delta U = 0$, т.е. для напряжений лавинного пробоя SiФЭУ. Такое значение ΔU было выбрано, поскольку отношение сигнал/шум для исследуемых фотоприемников имеет максимальное значение [15]. Отметим, что напряжение пробоя считалось рабочим напряжением для данных SiФЭУ.

На рис. 2, а представлена типичная зависимость чувствительности SiФЭУ от местонахождения (r) пятна оптического зонда для КОФ5-1035, для Ketek PM 3325 и ON Semi FC 30035 зависимости аналогичны. На рис. 2, б показана зависимость, построенная вдоль одной из диагоналей. Так, для Ketek PM 3325 и ON Semi FC 30035 (кривые 1, 2) диагональ составляет 4,2 мм, а для КОФ5-1035 (кривая 3) — 1,76 мм.

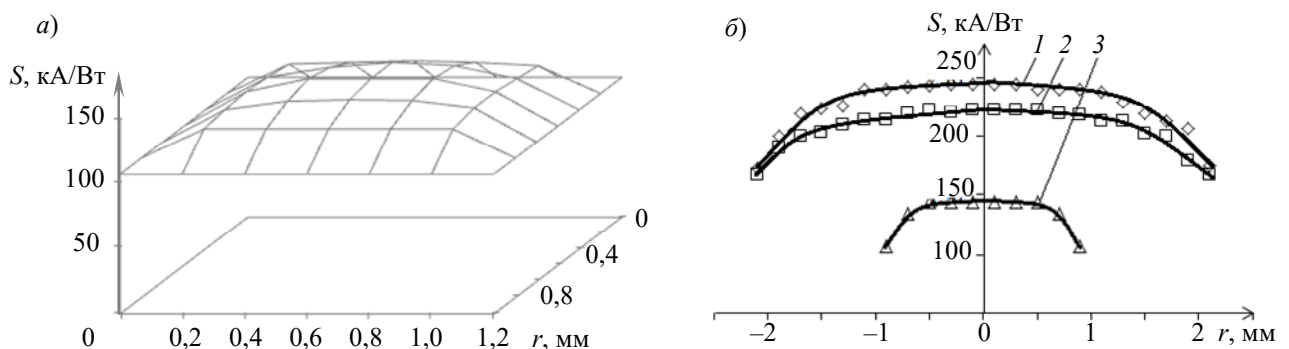


Рис. 2

Максимальное значение чувствительности наблюдается в центре фоточувствительной поверхности и уменьшается при приближении пятна оптического зонда к ее краю. Так, $S_{\max} = 245, 223$ и 144 кА/Вт и $S_{\min} = 173, 168$ и 107 кА/Вт для Ketek PM 3325, ON Semi FC 30035 и КОФ5-1035 соответственно. Иными словами, чувствительность в пределах фоточувствительной поверхности уменьшалась не более чем на 30 % для всех исследуемых фотоприемников. Изменение чувствительности в зависимости от местоположения пятна оптического зонда связано с тем, что напряжение лавинного пробоя отдельных ячеек SiФЭУ может отличаться.

Это приводит к тому, что при одном и том же напряжении питания на каждой ячейке будет разное значение перенапряжения. Чувствительность SiФЭУ, а значит, и каждой его ячейки зависит от перенапряжения [12]. Снижение чувствительности ячеек SiФЭУ, находящихся ближе к краю фоточувствительной поверхности, определяется, по-видимому, недостатками технологий изготовления этих фотоприемников.

На рис. 3 представлена зависимость неравномерности чувствительности δ SiФЭУ от перенапряжения ΔU : 1 — ON Semi FC 30035, 2 — КОФ5-1035, 3 — Ketek PM 3325. Увеличение перенапряжения приводит к уменьшению неравномерности чувствительности. Это объясняет тем, что с ростом перенапряжения для все большего числа ячеек напряжение питания SiФЭУ начинает превышать напряжение их пробоя. В результате значительно повышается чувствительность ячейки к оптическому излучению и уменьшается неравномерность чувствительности SiФЭУ. Для анализа зависимости $\delta(\Delta U)$ введен коэффициент $\Delta\delta/\Delta U_{\text{п}}$, где $\Delta\delta$ — изменение значения δ при изменении перенапряжения на $\Delta U_{\text{п}}$. Тогда при $\Delta U < 0$ отношение $\Delta\delta/\Delta U_{\text{п}} = 0,04, 0,08$ и $0,18 \text{ В}^{-1}$ для Ketek PM 3325, ON Semi FC 30035 и КОФ5-1035 соответственно; при $\Delta U > 0$ величина $\Delta\delta/\Delta U_{\text{п}} = 0,02 \text{ В}^{-1}$ для всех фотоприемников.

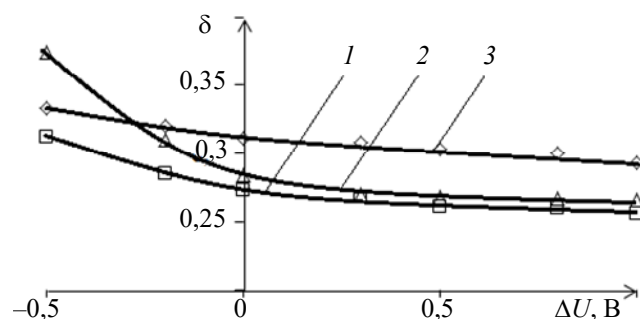


Рис. 3

Таким образом, наиболее сильная зависимость δ от перенапряжения проявляется при $\Delta U < 0$ для всех исследуемых SiФЭУ. Это связано с тем, что при $\Delta U = -0,5 \text{ В}$ приблизительно для 45 % ячеек напряжение питания SiФЭУ превышает напряжения их пробоя, а при $\Delta U = 0$ их становится приблизительно 65 %. В диапазоне $0,0 < \Delta U \leq 1,0 \text{ В}$ количество ячеек, для которых напряжение питания SiФЭУ превышает напряжения их пробоя, изменяется от 65 до 75 %.

Наибольшие значения S_{max} и S_{min} соответствуют Ketek PM 3325, а наименьшие — КОФ5-1035 на всей площади фоточувствительной поверхности исследуемых фотоприемников.

Результаты исследования эффективной площади фоточувствительной поверхности исследуемых SiФЭУ приведены в таблице, где A — полная площадь фоточувствительной поверхности.

Тип фотоприемника	$\Delta U, \text{В}$	$A_{\text{эф}}, \text{мм}^2$	$A, \text{мм}^2$	$A_{\text{эф}}/A$
Ketek PM 3325	-0,5	4,2	9,00	0,46
	0,0	5,8		0,65
	1,0	6,9		0,76
ON Semi FC 30035	-0,5	4,0	9,00	0,44
	0,0	5,8		0,65
	1,0	6,8		0,76
КОФ5-1035	-0,5	0,6	1,56	0,41
	0,0	1,0		0,64
	1,0	1,2		0,77

На рис. 4 представлена зависимость отношения $A_{\text{эф}}/A$ от перенапряжения ΔU : 1 — КОФ5-1035; 2 — ON Semi FC 30035; 3 — Ketek PM 3325.

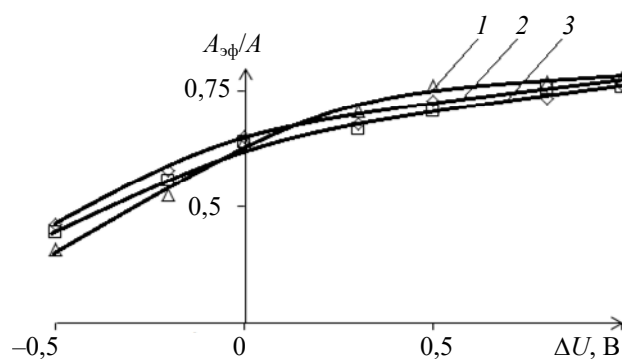


Рис. 4

Анализ графиков показывает, что рост переапряжения приводит к увеличению площади эффективной фоточувствительной поверхности, а значит, и количества ячеек, для которых напряжение питания SiФЭУ превышает напряжения их пробоя.

Таким образом, значения отношения $A_{эф}/A$ для всех исследуемых фотоприемников примерно одинаковы при постоянном значении переапряжения.

Заключение. По результатам экспериментального изучения важных характеристик кремниевых фотоумножителей определено следующее:

— эффективная площадь фоточувствительной поверхности исследуемых SiФЭУ при рабочем напряжении составила $5,8 \text{ мм}^2$ для Ketek PM 3325 и ON Semi FC 30035 и $1,0 \text{ мм}^2$ для КОФ5-1035;

— рост напряжения питания приводит к увеличению площади эффективной фоточувствительной поверхности;

— максимальное значение чувствительности при рабочем напряжении SiФЭУ наблюдается в центральной части фоточувствительной поверхности и симметрично уменьшается при приближении пятна оптического зонда к краю этой поверхности;

— при напряжении питания SiФЭУ, равном напряжению лавинного пробоя, площадь фоточувствительной поверхности, чувствительность в которой уменьшается не более чем на 10 % от максимального значения, составляет 64 – 65 % для всех исследуемых SiФЭУ;

— во всем диапазоне исследуемых напряжений чувствительность исследуемых SiФЭУ снижалась не более чем на 32 % от своего максимального значения; увеличение переапряжения приводит к уменьшению неравномерности чувствительности SiФЭУ и увеличению эффективной площади фоточувствительной поверхности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Клемин С. и др. Кремниевый фотоэлектронный умножитель. Новые возможности // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2007. № 8. С. 80—86.
2. Stagliano M., Abegão L., Chiericia A., d'Errico F. Silicon photomultiplier current and prospective applications in biological and radiological photonics // EPN — Intern. Journal of Science and Engineering. 2018. Vol. 4, iss. 10. P. 21.
3. Modi M. N., Daie K., Turner G. C., Podgorski K. Two-photon imaging with silicon photomultipliers // Opt. Express. 2019. Vol. 27, N 24. P. 35830.
4. Соболева Н. А., Меламид А. Е. Фотоэлектронные приборы. М.: Высш. школа, 1974. 376 с.
5. Гулаков И. Р., Холондырев С. В. Метод счета фотонов в оптико-физических измерениях. Минск: Университетское, 1989. 256 с.
6. Лебедев А. И. Физика полупроводниковых приборов. М.: Физмалит, 2008. 488 с.
7. Войцеховский А. В., Ижнин И. И., Савчин В. П., Вакив Н. М. Физические основы полупроводниковой фотоэлектроники. Томск: Изд. дом Томск. гос. ун-та, 2013. 560 с.

8. O'Neill K., Pavlov N., Jackson C. Новый кремниевый фотоумножитель с быстродействующим выходом компании SensL // Фотоника. 2013. № 1 (37). С. 76—83.
9. Дудник А. В., Курбатов Е. В., Валтонен Э. Амплитудные и скоростные характеристики многопиксельных счетчиков фотонов S10931-050P и S10931-100P производства „Hamamatsu Photonics“ // Journal of Kharkiv University: Physical series „Nuclei, Particles, Fields“. 2012. Vol. 991, iss. 1 /53/. P. 69—74.
10. Ramadhani E. A. Mini Review of Lifi Technology: Security Issue // Intern. Journal of Computer and Information System (IJCIS) Peer Reviewed. 2022. Vol. 03, iss. 03. P. 90—93.
11. Исследование характеристик матричных лавинных фотоприемников в режиме счета фотонов / И. Р. Гулаков, А. О. Зеневич, Е. В. Новиков, О. В. Кочергина, А. А. Лагутик // Успехи прикладной физики. 2021. Т. 9, № 3. С. 216—223.
12. Гулаков И. Р., Зеневич А. О., Кочергина О. В. Спектральные характеристики кремниевых фотоэлектронных умножителей // Успехи прикладной физики. 2021. Т. 9, № 2. С. 164—171.
13. Зеневич А. О., Кочергина О. В. Исследование динамического диапазона кремниевых фотоэлектронных умножителей // Изв. вузов. Электроника. 2021. Т. 26, № 1. С. 30—39.
14. Гулаков И. Р., Зеневич А. О. Фотоприемники квантовых систем. Минск: УО ВГКС, 2012. 276 с.
15. Асаенок М. А., Зеневич А. О., Кочергина О. В., Новиков Е. В., Сорока С. А. Работа кремниевых фотоэлектронных умножителей со структурой p^+p-n^+ в режиме одноквантовой регистрации // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. 2020. Т. 65, № 3. С. 349—356.

Сведения об авторах

- Иван Романович Гулаков** — д-р техн. наук, профессор; Белорусская государственная академия связи, кафедра математики и физики; E-mail: gulakov@bsu.by
- Андрей Олегович Зеневич** — д-р техн. наук, профессор; Белорусская государственная академия связи; ректор; E-mail: a.zenevich@bsac.by
- Ольга Викторовна Кочергина** — Белорусская государственная академия связи, кафедра радио и информационных технологий; преподаватель; E-mail: o.kochergina@bsac.by

Поступила в редакцию 23.06.2023; одобрена после рецензирования 08.07.2023; принята к публикации 27.09.2023.

REFERENCES

1. Klemin S. et al. *Electronics: Science, Technology, Business*, 2007, no. 8, pp. 80–86. (in Russ.)
2. Stagliano M., Abegão L., Chiericia A., and d'Errico F. *EPH - Intern. J. of Science and Engineering*, 2018, no. 10(4), pp. 21.
3. Modi M.N., Daie K., Turner G.C., Podgorski K. *Optics express*, 2019, no. 24(27), pp. 35830.
4. Soboleva N.A., Melamid A.E. *Fotoelektronnyye pribory* (Photoelectronic Devices), Moscow, 1974, 376 p. (in Russ.)
5. Gulakov I.R., Kholondyrev S.V. *Metod scheta fotonov v optiko-fizicheskikh izmereniyakh* (Photon Counting Method in Optical-Physical Measurements), Minsk, 1989, 256 p. (in Russ.)
6. Lebedev A.I. *Fizika poluprovodnikovykh priborov* (Physics of Semiconductor Devices), Moscow, 2008, 488 p. (in Russ.)
7. Voytsekhovskiy A.V., Izhnin I.I., Savchin V.P., Vakiv N.M. *Fizicheskiye osnovy poluprovodnikovoy fotoelektroniki* (Physical Foundations of Semiconductor Photoelectronics), Tomsk, 2013, 560 p. (in Russ.)
8. O'Neill K., Pavlov N., Jackson C. *Photonics Russia*, 2013, no. 1(37), pp. 76–83. (in Russ.)
9. Dudnik A.V., Kurbatov E.V., Valtonen E. *Journal of Kharkiv University: Physical series «Nuclei, Particles, Fields»*, 2012, no. 1(991), pp. 69–74.
10. Ramadhani E. *Intern. J. of Computer and Information System (IJCIS) Peer Reviewed*, 2022, no. 03(03), pp. 90–93.
11. Gulakov I.R., Zenevich A.O., Novikov E.V., Kochergina O.V., Lagutik A.A. *Advances in Applied Physics*, 2021, no. 3(9), pp. 216–223. (in Russ.)
12. Gulakov I.R., Zenevich A.O., Novikov E.V., Kochergina O.V., Lagutik A.A. *Advances in Applied Physics*, 2021, no. 2(9), pp. 164–171. (in Russ.)
13. Zenevich A.O., Kochergina O.V. *Semiconductors*, 2021, no. 1(26), pp. 30–39. (in Russ.)
14. Gulakov I.R., Zenevich A.O. *Fotopriyemniki kvantovykh sistem* (Photodetectors of Quantum Systems), Minsk, 2012, 276 p. (in Russ.)
15. Asayonak M.A., Zenevich A.O., Kacharhina V.V., Novikau Ya.V., Saroka S.A. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physico-Technical Series*, 2020, no. 3(65), pp. 349–356. (in Russ.)

Data on authors

- Ivan R. Gulakov** — Dr. Sci., Professor; Belarusian State Academy of Communications, Department of Mathematics and Physics; E-mail: gulakov@bsu.by

Andrey O. Zenevich — Dr. Sci., Professor; Belarusian State Academy of Communications; Rector of the Academy; E-mail: a.zenevich@bsac.by
Olga V. Kochergina — Belarusian State Academy of Communications, Department of Radio and Information Technologies; Lecturer; E-mail: o.kochergina@bsac.by

Received 23.06.2023; approved after reviewing 08.07.2023; accepted for publication 27.09.2023.