

ISSN 1561-8358 (Print)

ISSN 2524-244X (Online)

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2026-71-2-158-165>

УДК 621.38

Оригинальная статья

А. О. Зеневич¹, О. В. Кочергина^{1*}, Н. И. Мухуров²,
О. Н. Куданович², С. В. Денисюк²

¹Учреждение образования «Белорусская государственная академия связи»,
ул. Ф. Скорины 8/2, 220114, Минск, Республика Беларусь

²ГПНО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»,
Логойский тракт, 22, 220090, Минск, Республика Беларусь

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КРЕМНИЕВЫХ ФОТОУМНОЖИТЕЛЕЙ В ВИЗУАЛИЗАТОРАХ БЛИЖНЕГО ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Аннотация. Проведена оценка возможности использования кремниевых фотоумножителей (SiФЭУ) в визуализаторе для определения мощности лазера инфракрасного излучения. Объектами исследований были выбраны кремниевые фотоумножители со структурой p^+-p-p^+ модели ON Semi FC 30035 производства США. Такой прибор имеет площадь фоточувствительной поверхности, достаточную для согласования ее с площадью поверхности визуализатора, на которой находится люминофор. Для проведения исследований в ГПНО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» были созданы пленки с люминофором. В результате определена равномерность чувствительности кремниевого фотоумножителя по всей фоточувствительной поверхности фотоприемника. Показано, что использование люминофоров совместно с SiФЭУ позволяет расширить область спектральной чувствительности кремниевого фотоприемника на длины волн 1490 и 1550 нм инфракрасного излучения. Установлено, что обеспечить максимум отношения сигнал/шум удастся при напряжениях питания SiФЭУ, соответствующих его напряжению пробоя, для визуализатора при подаче на него инфракрасного излучения с длинами волн 980, 1490 и 1550 нм. Показана возможность использования кремниевых фотоумножителей в визуализаторе для определения мощности инфракрасного излучения.

Ключевые слова: кремниевый фотоумножитель, визуализатор, инфракрасное излучение, люминофор, чувствительность, пороговая мощность.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах: Зеневич Андрей Олегович – доктор технических наук, профессор, ректор УО «Белорусская государственная академия связи», <https://orcid.org/0000-0002-3534-3885>, e-mail: a.zenevich@bsac.by; Кочергина Ольга Викторовна – кандидат технических наук, заведующий кафедрой радио- и информационных технологий УО «Белорусская государственная академия связи», <https://orcid.org/0000-0002-3597-0395>, e-mail: o.kochergina@bsac.by; Мухуров Николай Иванович – доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией микро- и наносенсорики ГПНО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника», <https://orcid.org/0000-0002-9340-4682>, e-mail: mukhurov@oelt.basnet.by; Куданович Олег Николаевич – заместитель заведующего лабораторией микро- и наносенсорики ГПНО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника», <https://orcid.org/0009-0002-2898-1448>, e-mail: kudanovich@oelt.basnet.by; Денисюк Сергей Валентинович – научный сотрудник лаборатории микро- и наносенсорики ГПНО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника», <https://orcid.org/0009-0009-0242-9680>, e-mail: denisyuk@oelt.basnet.by

Вклад авторов: Зеневич Андрей Олегович – разработка концепции исследования, создание модели исследований; Кочергина Ольга Викторовна – проведение измерений, интерпретация результатов исследований, написание и оформление текста рукописи; Мухуров Николай Иванович – разработка концепции исследований свойств люминофора; Куданович Олег Николаевич – изготовление люминофора, проведение исследований; Денисюк Сергей Валентинович – изготовление люминофора, проведение исследований.

Для цитирования: Использование кремниевых фотоумножителей в визуализаторах ближнего инфракрасного излучения / А. О. Зеневич, О. В. Кочергина, Н. И. Мухуров [и др.] // Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2026. – Т. 71, № 2. – С. 158–165. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2026-71-2-158-165>

Поступила в редакцию: 22.10.2025

Доработанный вариант: 24.04.2026

Утверждена к публикации: 04.06.2026

Подписана в печать: 15.06.2026

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author.

Original article

Andrey O. Zenevich¹, Olga V. Kochergina¹, Nikolai I. Mukhurov², Oleg N. Kudanovich², Sergey V. Denisjuk²

¹Belarusian State Academy of Telecommunications, 8/2, F. Skorina St., 220114, Minsk, Republic of Belarus

²State Scientific and Production Association of Optics, Optoelectronics and Laser Technology,
22, Logoiski Trakt, 220090, Minsk, Republic of Belarus

USE OF SILICON PHOTOMULTIPLIERS IN NEAR-INFRACTORY VISUALIZERS

Abstract. The feasibility of using silicon photomultipliers (SiPMs) in a visualizer for determining infrared laser power was assessed. The study subjects were the ON Semi FC 30035 p^+p-n^+ silicon photomultipliers (SiPMs) manufactured in the USA. Such a device has a photosensitive surface area sufficient to match the surface area of the visualizer, which contains the phosphor. Phosphor-coated films were created for the study at the Optics, Optoelectronics, and Laser Engineering State Scientific Research Institute. The study demonstrated uniformity of the silicon photomultiplier sensitivity across the entire photosensitive surface of the photodetector. It was demonstrated that the use of phosphors in conjunction with SiPMs allows for expanding the spectral sensitivity of the silicon photodetector to wavelengths of 1490 and 1550 nm infrared radiation. It was found that the maximum signal-to-noise ratio can be achieved with SiPM supply voltages corresponding to its breakdown voltage for the visualizer when applying infrared radiation with wavelengths of 980, 1490, and 1550 nm. The feasibility of using silicon photomultipliers in the visualizer to determine the infrared radiation power is demonstrated.

Keywords: silicon photomultiplier, visualizer, infrared radiation, phosphor, sensitivity, threshold power

Conflict of interest: the authors declare that they have no conflict of interest.

Information about the authors: Andrey O. Zenevich – Dr. Sci. (Engineering), Professor, Rector at Belarusian State Academy of Communications, <https://orcid.org/0000-0002-3534-3885>, e-mail: a.zenevich@bsac.by; Olga V. Kochergina – Cand. Sci. (Engineering), Head of the Department of Radio and Information Technologies at Belarusian State Academy of Communications, <https://orcid.org/0000-0002-3597-0395>, e-mail: o.kochergina@bsac.by; Nikolai I. Mukhurov – Dr. Sci. (Engineering), Professor, Head of the Micro- and Nanosensors Laboratory at State Research and Production Enterprise “Optics, Optoelectronics and Laser Technology”, <https://orcid.org/0000-0002-9340-4682>, e-mail: mukhurov@oelt.basnet.by; Oleg N. Kudanovich – Deputy Head of the Micro- and Nanosensors Laboratory at State Research and Production Enterprise “Optics, Optoelectronics and Laser Technology”, <https://orcid.org/0009-0002-2898-1448>, e-mail: kudanovich@oelt.basnet.by; Sergey V. Denisjuk – Research Fellow of the Micro- and Nanosensors Laboratory at State Research and Production Association “Optics, Optoelectronics and Laser Technology”, <https://orcid.org/0009-0009-0242-9680>, e-mail: denisyuk@oelt.basnet.by

Contribution of the authors: Andrey O. Zenevich – development of the research concept, creation of the research model; Olga V. Kochergina – measurement, interpretation of research results, writing and formatting of the manuscript; Nikolai I. Mukhurov – development of the research concept for the properties of the phosphor; Oleg N. Kudanovich – production of the phosphor, research; Sergey V. Denisjuk – production of the phosphor, research.

For citation: Zenevich A. O., Kochergina O. V., Mukhurov N. I., Kudanovich O. N., Denisjuk S. V. Use of silicon photomultipliers in near-infractory visualizers. *Vesti Natsyynal'noi akademii nauk Belarusi. Seriya fizika-tekhnichnykh nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2026, vol. 71, no. 2, pp. 158–165 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2026-71-2-158-165>

Received: 22.10.2025

Modified: 24.04.2026

Approved for publication: 04.06.2026

Signed to the press: 15.06.2026

Введение. В настоящее время для настройки лазерных систем и работы с лазерами ближнего инфракрасного излучения (ИК-излучения) применяют визуализаторы [1–3]. Данные приборы преобразуют ближнее ИК-излучение лазеров в излучение, видимое человеческим глазом. Для преобразования ИК-излучения в видимое используется специально синтезированное вещество (люминофор), обладающее антистоксовой люминесценцией.

Визуализаторы в качестве законченных устройств выпускаются, в частности, ООО «Фотонные Технологические Системы» (PhotonTechSystem LLC, Россия), ООО «Полироник» (Россия). По своей конструкции прибор зачастую представляет собой керамическую шайбу с люминофором, закрепленную в специальной оправе с ручкой. Также в визуализаторах вместо шайбы используются экран с люминофором в виде карточки, заламинированной в прозрачном пластике, или диск с наличием на его поверхности люминофора [1].

Для регистрации визуализатором ИК-излучения лазера его устанавливают перпендикулярно направлению распространения лазерного пучка. В результате чего лазерный пучок попадает на люминофор и приводит к его свечению в видимой области спектра излучения. Таким образом происходит визуальное наблюдение лазерного ИК-излучения.

Однако кроме визуального наблюдения за наличием видимого излучения люминофора визуализатора, необходимо определять мощность этого излучения и пороговый уровень мощности ИК-излучения лазера, для которого удастся визуально наблюдать это излучение. Такое определение позволяет упростить устройства контроля за ИК-излучением лазера за счет исключения оптических схем отвода части этого излучения на устройство измерения мощности. Также следует отметить, что для оптических схем отвода достаточно мощного ИК-излучения (≥ 1 кВт) необходимо использовать оптические элементы с высокой лучевой прочностью. Это усложняет и удорожает реализацию таких оптических схем. Использование визуализатора с возможностью определения мощности ИК-излучения лазера позволит упростить и удешевить оптическую схему контроля за этой мощностью.

Для определения мощности излучения люминофора визуализатора можно использовать фотоприемники, чувствительные к спектральному диапазону видимого излучения. Лучшее всего для решения этой задачи подходят кремниевые фотоумножители (*SiФЭУ*). Это связано с тем, что такие приборы имеют низкие напряжения питания и меньшие габариты по сравнению с электровакуумными фотоприемниками. Также у *SiФЭУ* большая площадь фоточувствительной поверхности и достаточно высокая чувствительность в видимой области спектра по сравнению с однопиксельными лавинными фотодиодами [4; 5].

При регистрации мощности излучения люминофора визуализатора для фотоприемника важным параметром выступает площадь фоточувствительной поверхности, совпадающая для оптимального решения поставленных задач с площадью поверхности визуализатора, на которой находится люминофор. В этом случае не требуется оптическая система для направления видимого излучения от люминофора на фоточувствительную поверхность фотоприемника, что упрощает устройство визуализатора с возможностью определения мощности ИК-излучения лазера.

Отметим, что *SiФЭУ* имеют достаточно большую площадь фоточувствительной поверхности, подходящую для полного согласования с площадью поверхности визуализатора, на которую нанесен люминофор. Помимо этого, согласование площадей необходимо, чтобы *SiФЭУ* обеспечивали равномерность чувствительности по всей фоточувствительной поверхности. Однако в настоящее время данная характеристика фотоумножителей для различных длин волн видимого излучения не контролируется и не установлена зависимость этой характеристики от напряжения питания прибора. Определение такой характеристики и ее зависимости от напряжения питания позволит оценить возможность использования *SiФЭУ* в визуализаторах для контроля мощности ИК-излучения лазера.

Цель работы – исследование равномерности чувствительности кремниевого фотоумножителя по всей фоточувствительной поверхности и анализ возможности использования *SiФЭУ* в визуализаторе для установления постоянной мощности инфракрасного излучения лазера.

Экспериментальная установка и методика исследований. Объектами исследований были выбраны кремниевые фотоумножители со структурой p^+-p-n^+ модели ON Semi FC 30035 (США). Данные фотоприемники имеют достаточно большую площадь фоточувствительной площадки (9 мм^2) и небольшое значение темновых токов (около 50 нА) при рабочих напряжениях питания. Отметим, что такая площадь фоточувствительной площадки является достаточной для согласования ее с площадью поверхности визуализатора, на которой находится люминофор. Для проведения исследований люминофор был изготовлен в ГПНО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» Национальной академии наук Беларуси.

Определение равномерности чувствительности кремниевого фотоумножителя по всей фоточувствительной поверхности выполнено на разработанной для оценки возможности использования кремниевых фотоумножителей в визуализаторе по определению мощности ИК-излучения лазера экспериментальной установке (рис. 1) и согласно методике, описанной в [6; 7]. При этом оптическое пятно диаметром 500 мкм сканировалось по фоточувствительной площадке кремниевого фотоумножителя.

В состав используемого визуализатора инфракрасного лазерного излучения (П) входила шайба, выполненная в виде пластины с нанесенным на нее слоем люминофора (синтезированные порошки на основе оксида иттрия с внедренными в его матрицу эрбием и иттербием). Для синтеза применялся модифицированный метод Печини [8], включающий в себя стадии образо-

вания металлоорганических (хелатных) комплексных соединений, реакцию полимеризации (этерификации) между органической кислотой и многоатомным спиртом (например, лимонной кислотой и этиленгликолем) и кальцинирования. Данный метод был выбран в связи с его простотой, универсальностью и высокой однородностью получаемых составов по сравнению с другими методами [8].

В экспериментах осуществлялась визуализация ближнего ИК-излучения лазеров с разной длиной волны – 980, 1490 и 1550 нм, и мощностью 20 мВт и более. Приборы с упомянутыми характеристиками находят широкое применение в промышленности и системах оптической связи [9; 10].

При проведении исследований нами использовались полупроводниковые лазеры с постоянной мощностью оптического излучения 20 мВт. Отметим, что длина волны оптического излучения 980 нм соответствует области спектральной чувствительности исследуемого SiФЭУ.

Для того чтобы фотоумножитель мог регистрировать оптическое излучение, поступающее с выхода визуализатора, на него от источника питания (ИП) подавали напряжение питания, близкое или превышающее значение напряжения пробоя. Далее такое напряжение (напряжение питания) будем называть рабочим. Оно контролировалось вольтметром (Вм). Для измерения электрического тока, протекающего через SiФЭУ, использовался амперметр (А).

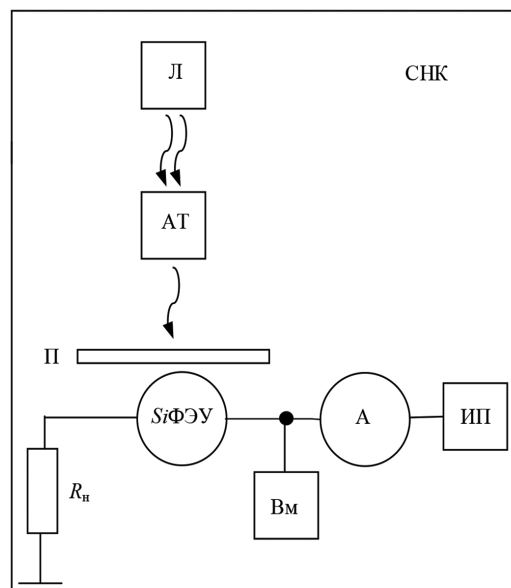


Рис. 1. Структурная схема экспериментальной установки: Л – лазер; АТ – аттенуатор; П – визуализатор; А – амперметр; Вм – вольтметр; ИП – источник питания; R_n – сопротивление нагрузки; SiФЭУ – кремниевый фотоумножитель; СНК – светонепроницаемая камера

Fig. 1. Structural diagram of the experimental setup: Л – laser; АТ – attenuator; П – visualizer; А – ammeter; Вм – voltmeter; ИП – power supply; R_n – load resistance; SiФЭУ – silicon photodetector; СНК – light-tight chamber

Т а б л и ц а 1. Характеристики используемого люминофора
 Table 1. Characteristics of the phosphor used

Люминофор Phosphor	Длина волны лазерного излучения, нм Laser wavelength, nm	Длина волны антистоксовой люминесценции, нм Anti-stokes luminescence wavelength, nm	Квантовый выход Quantum yield
Подложка Y_2O_3 с атомами Er:Yb в соотношении 6 : 4 Y_2O_3 substrate with Er:Yb atoms in a 6 : 4 ratio	980	650 ± 30	0,110
	1490		0,002
	1550		0,030

Напряжение пробоя кремниевого фотоумножителя ON Semi FC 30035 составляло 24,7 В. Рабочие напряжения для данного SiФЭУ выбирались в пределах не менее 0,5 В от напряжения его пробоя и не более 1,0 В. Это связано с тем, что при меньших напряжениях питания чувствительность SiФЭУ не позволяет регистрировать сигнал, а при больших величина тока, протекающего через фотоприемник, велика и может привести к его тепловому пробоя.

Последовательно с SiФЭУ был включен нагрузочный резистор (R_n) для ограничения электрического тока, протекающего через фотоумножитель.

Экспериментальная установка находилась в специальной светонепроницаемой камере (СНК), что обеспечивало защиту от влияния внешних оптических излучений. Если на SiФЭУ не поступало оптическое излучение, то амперметр (А) регистрировал темновой ток (I_T). В случае поступления на SiФЭУ оптического излучения измерялся общий ток, протекающий через фотоприемник (I_{Φ}). Фототок (I_{Φ}) определялся согласно выражению $I_{\Phi} = I_{\Phi} - I_T$.

Чувствительность кремниевого фотоумножителя к ИК-излучению (S) рассчитывалась следующим образом:

$$S = \frac{I_{\phi}}{\eta P}, \quad (1)$$

где η – квантовый выход люминофора; P – мощность излучения лазера.

Неравномерность чувствительности использованной модели SiFЭУ определялась на основании ГОСТ Р 59607–2021¹ так, как показано в [6].

При проведении исследований контролировалась зависимость отношения сигнал/шум SiFЭУ (ρ) от его напряжения питания. Величина отношения сигнал/шум кремниевого фотоумножителя вычислялась по формуле

$$\rho = \frac{I_{\phi}}{\sqrt{2eI_{\text{тф}}FM\delta + \frac{4kT\delta}{R}}}, \quad (2)$$

где e – заряд электрона; F – шум-фактор; M – коэффициент усиления общего тока; δ – полоса пропускания фотоприемника; k – постоянная Больцмана; T – температура; R – электросопротивление нагрузки.

Методика определения коэффициента усиления M описана в [11]. Ранее были проведены исследования шум-фактора (F) и полосы пропускания фотоприемника (δ) [11; 12]. Значение шум-фактора составляет $F = 1$, полоса пропускания – 1,6 МГц.

Пороговая мощность для SiFЭУ (P_n) при проведении исследований определялась из следующего выражения:

$$P_n = \frac{hc}{\lambda\eta} FM\delta \left(1 + \sqrt{1 + \frac{2eI_{\text{тф}}FM + \frac{4kT}{R}}{(eFM)^2\delta}} \right), \quad (3)$$

где c – скорость света в вакууме; λ – длина волны оптического излучения; h – постоянная Планка.

Результаты измерений и их обсуждение. Для определения напряжения питания SiFЭУ , которому соответствует его максимальная чувствительность, были измерены зависимости отношения сигнал/шум от величины перенапряжения ΔU . Измерения выполнялись при температуре окружающей среды 293 К. Отношения сигнал/шум определены для одинаковых мощностей лазерного излучения 20 мВт.

Как следует из представленных на рис. 2 зависимостей, отношение сигнал/шум для визуализатора имеет максимум при напряжениях питания, соответствующих напряжению пробоя SiFЭУ , при воздействии ИК-излучения с длинами волн 980, 1490 и 1550 нм. Такой максимум обусловлен характером изменения темнового и фототоков при увеличении напряжения питания. При $\Delta U < 0$ В наблюдается незначительное увеличение темнового и фототока, что связано с малым количеством свободных носителей в области p – n -перехода каждой из ячеек SiFЭУ . При $\Delta U > 0$ В отмечается возрастание фототока над темновым более чем в 10 раз. Рост напряжения питания фотоприемника приводит к увеличению-количества p – n -переходов, для которых напряжения питания начинают превышать напряжения их пробоя, а также к росту размеров областей лавинного умножения заряда и, соответственно, к увеличению количества свободных носителей заряда в этих областях и, как следствие, росту величины темнового тока.

¹ ГОСТ Р 59607–2021. Приемники излучения полупроводниковые. Фотоэлектрические и фотоприемные устройства. Методы измерений фотоэлектрических параметров и определения характеристик. М.: Рос. ин-т стандартизации, 2021. 53 с.

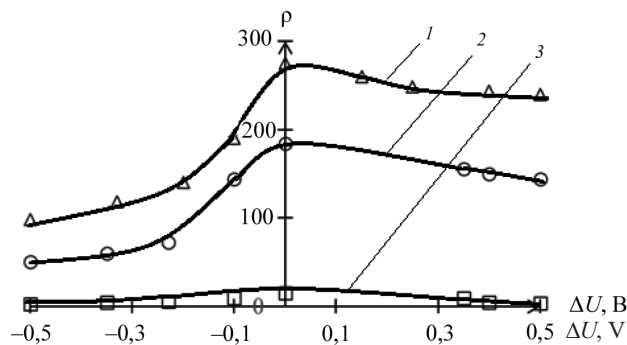


Рис. 2. Зависимость отношения сигнал/шум от перенапряжения для люминесцирующего оптического излучения и длины волны лазерного излучения: кривая 1 – 980 нм; кривая 2 – 1550 нм; кривая 3 – 1490 нм

Fig. 2. Dependence of the signal-to-noise ratio on the overvoltage for luminescent optical radiation for a laser wavelength of: curve 1 – 980 nm; curve 2 – 1550 nm; curve 3 – 1490 nm

Из рис. 2 следует, что отношение сигнал/шум для люминофора при излучении лазера с длиной волны 980 нм больше, чем при излучении лазера с длинами волн 1550 и 1490 нм, и составляет $\rho = 275$, $\rho = 184$ и $\rho = 15$ соответственно. Такое отличие в значениях отношения сигнал/шум связано с разным квантовым выходом люминофора (табл. 2).

Таблица 2. Характеристики визуализатора с наличием кремниевого фотоумножителя
 Table 2. Characteristics of a visualizer with a silicon photomultiplier

Люминофор Phosphor	Длина волны лазерного излучения, нм Laser wavelength, nm	Темновой ток, мкА Dark current, μA	Чувствительность люминесцирующего излучения, кА/Вт Sensitivity of luminescent radiation, kA/W	Пороговая мощность, Вт Threshold power, W
Подложка Y_2O_3 с атомами Er:Yb в соотношении 6 : 4 Y_2O_3 substrate with Er:Yb atoms in a 6 : 4 ratio	980	0,05	31,3	$2,4 \cdot 10^{-11}$
	1490		0,3	$4,6 \cdot 10^{-6}$
	1550		6,7	$9,3 \cdot 10^{-10}$

Наименьшее значение мощности инфракрасного лазерного излучения, которое удалось зарегистрировать, составило 24 пВт на длине волны 980 нм. Наибольшее значение пороговой мощности инфракрасного лазерного излучения наблюдалось для длины волны 1490 нм и составило 4,6 мкВт (см. табл. 2). Такое отличие в значениях пороговой мощности для различных длин волн инфракрасного лазерного излучения связано с различными квантовыми выходами для этих длин волн.

Экспериментальная оценка динамического диапазона визуализатора с наличием кремниевого фотоумножителя показала, что для оптического излучения с длинами волн 980, 1490 и 1550 нм он составил 4500, 4 и 300 соответственно.

На рис. 3 показана зависимость чувствительности кремниевого фотоумножителя от местоположения оптического пятна на фоточувствительной поверхности SiФЭУ при $\Delta U = 0$ В. Данная зависимость получена при сканировании оптического пятна по фоточувствительной площадке фотоприемника оптическим излучением с длиной волны 650 нм. Такая длина волны

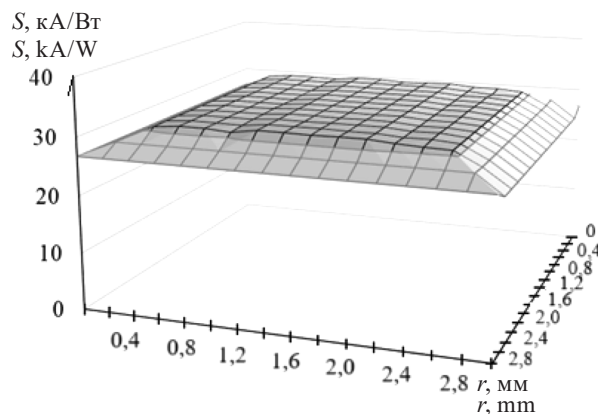


Рис. 3. Зависимость чувствительности кремневых фотоумножителей от места проецирования люминесцирующего пятна на фоточувствительную поверхность

Fig. 3. Dependence of the sensitivity of silicon photomultipliers on the location of the luminescent spot on the photosensitive surface

для сканирования была выбрана в связи с тем, что она соответствует длине волны антистоксового излучения люминофора для исследуемых длин волн инфракрасного излучения.

На 65 % площади фоточувствительной поверхности SiFЭУ чувствительность (S) составила 31,3 кА/Вт. Видно, что к краю такой поверхности значение S уменьшается до 25,2 кА/Вт. Такое изменение чувствительности к краю фоточувствительной площадки связано с особенностями технологии изготовления SiFЭУ . Таким образом, для обеспечения наибольшей чувствительности кремниевого фотоумножителя к ИК-излучению люминофор необходимо размещать на той части фоточувствительной поверхности, где чувствительность составила 31,3 кА/Вт.

Временные характеристики визуализатора в настоящей работе не рассматривались и станут предметом последующих исследований.

Заключение. Показано, что использование люминофоров совместно с SiFЭУ позволяет расширить область спектральной чувствительности кремниевого фотоприемника на длины волн 1490 и 1550 нм ИК-излучения.

Установлено, что при визуализации ИК-излучения с длинами волн 980, 1490 и 1550 нм и для обеспечения максимального отношения сигнал/шум значения напряжения питания SiFЭУ должны устанавливаться на уровне напряжения пробоя фотоумножителя. Такое напряжение целесообразно использовать в качестве рабочего для обеспечения максимальной чувствительности SiFЭУ к регистрируемому излучению после воздействия на люминофор инфракрасного излучения с указанными длинами волн.

Таким образом, результаты выполненных исследований подтверждают возможность применения кремниевых фотоумножителей в визуализаторе для определения мощности ИК-излучения.

Список использованных источников

1. Овсянкин, В. В. Кооперативная сенсibilизация люминесценции в кристаллах, активированных редкоземельными ионами / В. В. Овсянкин, П. П. Феофилов // Письма в ЖЭТФ. – 1966. – № 4. – С. 471–473.
2. Визуализатор двухмикронного лазерного излучения на основе $\text{CAF}_2\text{:HO}$ / А. А. Ляпин, П. А. Рябочкина, А. Н. Чабушкин [и др.] // Прикладная фотоника. – 2014. – № 1. – С. 58–65. <https://doi.org/10.15593/2411-4367/2014.1.05>
3. Евстропов, Т. О. Керамические визуализаторы для мощных ИК-лазеров / Т. О. Евстропов, С. С. Балабанов // Фотон-экспресс-наука. – 2023. – № 6. – С. 343–344.
4. Кремниевый фотоэлектронный умножитель. Новые возможности / С. Клемин, Ю. Кузнецов, Л. Филатов [и др.] // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – 2007. – № 8. – С. 80–86.
5. Silicon photomultiplier current and prospective applications in biological and radiological photonics / M. Stagliano, F. D'Errico, L. Abegão, A. Chierici // EPN – International Journal of Science and Engineering. – 2018. – Vol. 4, iss. 4. – P. 7–15. <https://doi.org/10.53555/eijse.v4i4.143>
6. Гулаков, И. Р. Эффективная фоточувствительная поверхность кремниевых фотоумножителей / И. Р. Гулаков, А. О. Зеневич, О. В. Кочергина // Известия вузов. Приборостроение. – 2023. – Т. 66, № 11. – С. 960–967. <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2023-66-11-960-967>
7. Гулаков, И. Р. Пространственные характеристики кремниевых фотоумножителей / И. Р. Гулаков, А. О. Зеневич, О. В. Кочергина // Известия вузов. Электроника. – 2024. – Т. 29, № 4. – С. 466–477. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-4-466-477>
8. Структура и люминесцентные свойства нанопорошков $\text{Gd}_2(\text{WO}_4)_3$ и $\text{Gd}_2(\text{WO}_4)_3\text{:Tm}^{3+}, \text{Yb}^{3+}$, синтезированных методами твердофазного спекания и Печини / Е. И. Вайшля, Е. В. Афанасьева, В. Д. Андреева, И. Е. Колесников // Неорганические материалы. – 2021. – Т. 57, № 8. – С. 846–851. <https://doi.org/10.31857/S0002337X21080327>
9. Шубин, В. В. Информационная безопасность волоконно-оптических систем связи / В. В. Шубин. – Саратов: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2015. – 257 с.
10. Дмитриев, С. А. Волоконно-оптическая техника: современное состояние и новые перспективы / С. А. Дмитриев, Н. Н. Слепов. – М.: Техносфера, 2010. – 576 с.
11. Усиление фототока лавинными фотоприемниками при микроплазменном пробое / М. А. Асаёнок, А. О. Зеневич, О. В. Кочергина, Е. В. Новиков // Успехи прикладной физики. – 2020. – Т. 8, № 2. – С. 117–122.
12. Зеневич, А. О. Исследование динамического диапазона кремниевых фотоэлектронных умножителей / А. О. Зеневич, О. В. Кочергина // Известия высших учебных заведений. Электроника. – 2021. – Т. 26, № 1. – С. 30–39. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2021-26-1-30-39>

References

1. Ovsyankin V. V., Feofilov P. P. Cooperative sensitization of luminescence in crystals activated by rare-earth ions. *JETP Letters*, 1966, no. 4, pp. 471–473 (in Russian).
2. Lyapin A. A., Ryabochkina P. A., Chabushkin A. N., Ushakov S. N., Fedorov P. P. Visualiser of two-micron laser radiation based on $\text{CAF}_2\text{:HO}$. *Applied Photonics*, 2014, no. 1, pp. 58–65 (in Russian). <https://doi.org/10.15593/2411-4367/2014.1.05>

3. Evstropov T. O., Balabanov S. S. Ceramic visualizers for high-power IR lasers. *Photon-Express-Science*, 2023, no. 6, pp. 343–344 (in Russian).
4. Klemin S., Kuznetsov Yu., Filatov L., Buzhan P., Dolgoshein B., Il'in A., Popova E. Silicon Photomultiplier. New Possibilities. *Electronics: Science, Technology, Business*, 2007, no. 8, pp. 80–86 (in Russian).
5. Stagliano M., D'Errico F., Abegão L., Chierici A. Silicon Photomultiplier: Current and Prospective Applications in Biological and Radiological Photonics. *EPH – International Journal of Science and Engineering*, 2018, vol. 4, iss. 4, pp. 7–15. <https://doi.org/10.53555/eijse.v4i4.143>
6. Gulakov I. R., Zenevich A. O., Kochergina O. V. Effective photosensitive surface of silicon photomultipliers. *Journal of Instrument Engineering*, 2023, vol. 66, no. 11, pp. 960–967 (in Russian). <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2023-66-11-960-967>
7. Gulakov I. R., Zenevich A. O., Kochergina O. V. Spatial characteristics of silicon photomultipliers. *Proceedings of Universities. Electronics*, 2024, vol. 29, no. 4, pp. 466–477 (in Russian). <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-4-466-477>
8. Vaishlya E. I., Afanasyeva E. V., Andreeva V. D., Kolesnikov I. E. Structure and luminescent properties of $\text{Gd}_2(\text{WO}_4)_3$ and $\text{Gd}_2(\text{WO}_4)_3:\text{Ti}^{3+}, \text{Yb}^{3+}$ nanopowders synthesized by solid-phase sintering and Pechini methods. *Inorganic Materials*, 2021, vol. 57, no. 8, pp. 846–851 (in Russian). <https://doi.org/10.31857/S0002337X21080327>
9. Shubin V. V. *Information Security of Fiber-Optic Communication Systems*. Sarov, RFNC-VNIIEF Publ., 2015. 257 p. (in Russian).
10. Dmitriev S. A., Slepov N. N. *Fiber-Optic Technology: Current State and New Prospects*. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2010. 576 p. (in Russian).
11. Asayonak M. A., Zenevich A. O., Kochergina O. V., Novikov E. V. Photocurrent amplification by avalanche photodetectors during microplasma breakdown. *Uspekhi prikladnoi fiziki = Advances in Applied Physics*, 2020, vol. 8, no. 2, pp. 117–122 (in Russian).
12. Zenevich A. O., Kochergina O. V. Study of the Dynamic Range of Silicon Photomultiplier Tubes. *News of Higher Educational Institutions. Electronics*, 2021, vol. 26, no. 1, pp. 30–39 (in Russian). <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2021-26-1-30-39>