

ISSN 1561-8358 (Print)  
ISSN 2524-244X (Online)  
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-1-69-78>  
УДК 621.383.92



*Оригинальная статья*

**И. Р. Гулаков, А. О. Зеневич, О. В. Кочергина\***

*Белорусская государственная академия связи,  
ул. Ф. Скорины, 8/2, 220114, Минск, Республика Беларусь*

## **ВЛИЯНИЕ ВНЕШНЕГО ФОНОВОГО ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ПЛОСКИЙ УГОЛ ЗРЕНИЯ КРЕМНИЕВЫХ ФОТОЭЛЕКТРОННЫХ УМНОЖИТЕЛЕЙ**

**Аннотация.** Представлены результаты исследования влияния внешнего фонового оптического излучения на плоский угол зрения кремниевых фотоэлектронных умножителей (SiФЭУ). Актуальность исследования обусловлена развитием открытых оптических систем, в которых оптическое излучение подвергается воздействию внешнего фонового оптического излучения, что может привести к ухудшению качества регистрируемого сигнала. При перемещении объекта в пространстве может меняться угол падения оптического излучения на фоточувствительную поверхность фотоприемника, поэтому одной из его наиболее важных характеристик, применяемых в открытых оптических системах связи, является плоский угол зрения. Для проведения исследования были выбраны кремниевые фотоэлектронные умножители трех моделей, имеющие схожую структуру и параметры, а именно КОФ5-1035, Ketek PM 3325 и ON Semi FC 30035. Установлено, что с увеличением уровня освещенности внешнего фонового оптического излучения диаграмма направленности фотоприемника сужается, что связано с уменьшением плоского угла зрения. Наиболее сильная зависимость величины плоского угла зрения от уровня освещенности наблюдалась для КОФ5-1035, а наиболее слабая – для Ketek PM 3325. Показано, что восстановить плоский угол зрения до первоначального значения можно путем повышения перенапряжения и использования светофильтра с полосой пропускания  $470 \pm 20$  нм. Максимальное значение освещенности, при котором существовала возможность восстановить величину плоского угла зрения до первоначального значения, составляла 3000 лк для всех исследуемых SiФЭУ. Полученные результаты представляют собой потенциально ценный ресурс для разработки и совершенствования оптических систем связи общего доступа.

**Ключевые слова:** кремниевый фотоэлектронный умножитель, внешнее фоновое оптическое излучение, угол падения оптического излучения, плоский угол зрения, ослепление

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Информация об авторах:** *Гулаков Иван Романович* – доктор физико-математических наук, профессор кафедры математики и физики Белорусской государственной академии связи. <https://orcid.org/0000-0002-7330-9928>. E-mail: [gulakov@bsu.by](mailto:gulakov@bsu.by); *Зеневич Андрей Олегович* – доктор технических наук, профессор, ректор Белорусской государственной академии связи. <https://orcid.org/0000-0002-3534-3885>. E-mail: [a.zenevich@bsac.by](mailto:a.zenevich@bsac.by); *Кочергина Ольга Викторовна* – кандидат технических наук, заведующий кафедрой радио и информационных технологий Белорусской государственной академии связи. <https://orcid.org/0000-0002-3597-0395>. E-mail: [o.kochergina@bsac.by](mailto:o.kochergina@bsac.by)

**Вклад авторов:** *Гулаков Иван Романович* – обоснование актуальности и цели исследования, разработка методологии исследования, формулирование выводов на основании результатов исследования, редактирование текста рукописи; *Зеневич Андрей Олегович* – обоснование концепции исследования, анализ и обобщение экспериментальных данных исследования; *Кочергина Ольга Викторовна* – анализ и обобщение литературных данных для постановки цели исследований, создание экспериментальной установки, проведение эксперимента, сбор, анализ и обобщение полученных результатов, подготовка текста рукописи, включая графический материал и ее оформление.

**Для цитирования:** Гулаков, И. Р. Влияние внешнего фонового оптического излучения на плоский угол зрения кремниевых фотоэлектронных умножителей / И. Р. Гулаков, А. О. Зеневич, О. В. Кочергина // Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2025. – Т. 70, № 1. – С. 69–78. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-1-69-78>

*Поступила в редакцию: 13.11.2024*

*Доработанный вариант: 04.02.2025*

*Утверждена к публикации: 06.03.2025*

*Подписана в печать: 12.03.2025*

Original article

Ivan R. Gulakov, Andrey O. Zenevich, Olga V. Kochergina\*

*Belarusian State Academy of Communications,  
8/2, F. Skorina Str., 220114, Minsk, Republic of Belarus***INFLUENCE OF EXTERNAL BACKGROUND OPTICAL RADIATION  
ON THE FLAT VIEW ANGLE OF SILICON PHOTOMULTIPLIER**

**Abstract.** The article presents the results of a study of the influence of external background optical radiation on the flat angle of view of silicon photomultiplier tubes (SiPMs). The relevance of the study is due to the development of open optical systems in which optical radiation is exposed to external background optical radiation, which can lead to deterioration in the quality of the recorded signal. When an object moves in space, the angle of incidence of optical radiation on the photosensitive surface of the photodetector can change, so one of its most important characteristics used in open optical communication systems is a flat angle of view. For the study, three models of silicon photomultipliers with similar structure and parameters were selected, namely KOF5-1035, Ketek RM 3325 and ON Semi FC 30035. It was found that with an increase in the illumination level of external background optical radiation, the directivity pattern of the photodetector narrows, which is associated with a decrease in the flat viewing angle. The strongest dependence of the flat viewing angle on the illumination level was observed for KOF5-1035, and the weakest – for Ketek RM 3325. It is shown that the flat viewing angle can be restored to the original value by increasing the overvoltage and using a light filter with a passband of  $470 \pm 20$  nm. The maximum illumination value at which it was possible to restore the flat viewing angle to the original value was 3000 lux for all the SiPMs studied. The results obtained are potentially valuable resource for development and improvement of shared access optical communication lines.

**Keywords:** silicon photomultiplier tube, external background optical radiation, angle of incidence of optical radiation, flat viewing angle, glare

**Conflict of interest:** the authors declare no conflict of interest.

**Information about the authors:** *Ivan R. Gulakov* – Dr. Sci (Physics and Mathematics), Professor of the Department of Mathematics and Physics at Belarusian State Academy of Communications. <https://orcid.org/0000-0002-7330-9928>. E-mail: [gulakov@bsu.by](mailto:gulakov@bsu.by); *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](mailto: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](mailto:o.kochergina@bsac.by)

**Contribution of the authors:** *Ivan R. Gulakov* – justification of the relevance and purpose of the study, development of research methodology, formulation of conclusions based on the results of the study, editing the text of the manuscript; *Andrey O. Zenevich* – substantiation of the research concept, analysis and generalization of experimental research data; *Olga V. Kochergina* – analysis and synthesis of literary data to set the purpose of the research, creation of an experimental setup, conducting an experiment, collecting, analyzing and summarizing the results obtained, preparing the text of the manuscript including graphic material and its design.

**For citation:** Gulakov I. R., Zenevich A. O., Kochergina O. V. Influence of external background optical radiation on the flat view angle of silicon photomultiplier. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2025, vol. 70, no. 1, pp. 69–78 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-1-69-78>

*Received:* 13.11.2024

*Modified:* 04.02.2025

*Approved for publication:* 06.03.2025

*Signed to the press:* 12.03.2025

**Введение.** В настоящее время широко используются системы инфокоммуникаций, построенные на использовании оптического излучения видимого диапазона спектра. Основанные на волоконно-оптических линиях связи проводные системы обеспечивают высокоскоростной доступ в интернет и качественную коммуникацию для значительной части населения.

Открытые оптические системы только начинают развиваться. Основным достоинством таких систем перед проводными является мобильность и большие скорости передачи данных, что позволяет создавать на их основе умные города, контролировать наземные, водные и воздушные транспортные потоки, управлять потоками данных [1–3].

При реализации открытых оптических систем источник оптического излучения может располагаться в любой точке пространства относительно фотоприемника. Кроме того, при обеспечении связи между движущимися объектами угол падения оптического излучения на фотоприемник изменяется. Поэтому одной из наиболее важных характеристик, применяемых в открытых оптических системах связи, является плоский угол зрения фотоприемника.

В открытых системах связи вместе с информационным сигналом на фотоприемник поступает внешнее фоновое оптическое излучения. Это приводит к появлению помех, вследствие чего уменьшается отношение сигнал/шум, а также изменяется плоский угол зрения [4–6].

Для использования в качестве фотоприемников в открытых системах связи наиболее перспективными являются кремниевые фотоэлектронные умножители (SiФЭУ), обладающие низкими напряжениями питания и хорошей чувствительностью в видимом диапазоне спектра [7–9].

Однако в настоящее время не установлено влияние внешнего фонового оптического излучения на плоский угол зрения кремниевых фотоэлектронных умножителей, что и явилось целью исследования.

**Экспериментальная установка и методика измерений.** Для проведения исследований были отобраны SiФЭУ трех моделей, имеющие схожую структуру и параметры, а именно КОФ5-1035 (холдинг ОАО «Интеграл», Беларусь), Ketek PM 3325 (Ketek, Германия) и ON Semi FC 30035 (Onsemi, США).

Структурная схема экспериментальной установки для проведения исследований представлена на рис. 1.

В экспериментальной установке сигнальный импульс оптического излучения, направляемый на SiФЭУ, формируется системой, состоящей из источника постоянного напряжения (ИП<sub>1</sub>), светодиода (С<sub>1</sub>), модулятора (М), генератора (Г) и аттенюатора (АТ). Наличие или отсутствие оптического сигнала, подаваемого на SiФЭУ, регулируется диафрагмой (Д<sub>1</sub>).

Длина волны оптического излучения С<sub>1</sub> равна  $\lambda = 470$  нм. Такая длина волны соответствует максимуму спектральной чувствительности всех исследуемых SiФЭУ [10] и относится к рабочему диапазону открытых систем связи, который находится в интервале от 380 до 760 нм [11].

Генератор (Г) формирует электрические импульсы длительностью 1 мкс и частотой следования 10 кГц. Выбранное значение частоты и длительности импульса позволяет избежать влияния явлений, возникающих в SiФЭУ после окончания регистрации одного импульса оптического излучения, на процесс регистрации следующего за ним импульса излучения и зарегистрировать каждый из сформированных импульсов. Аттенюатор позволяет ослабить оптическое излучение в диапазоне энергетической экспозиции от 10 до 0,01 нДж/м<sup>2</sup>, что дает возможность обеспечить работу исследуемых SiФЭУ в пределах их динамического диапазона [12]. Таким образом форми-

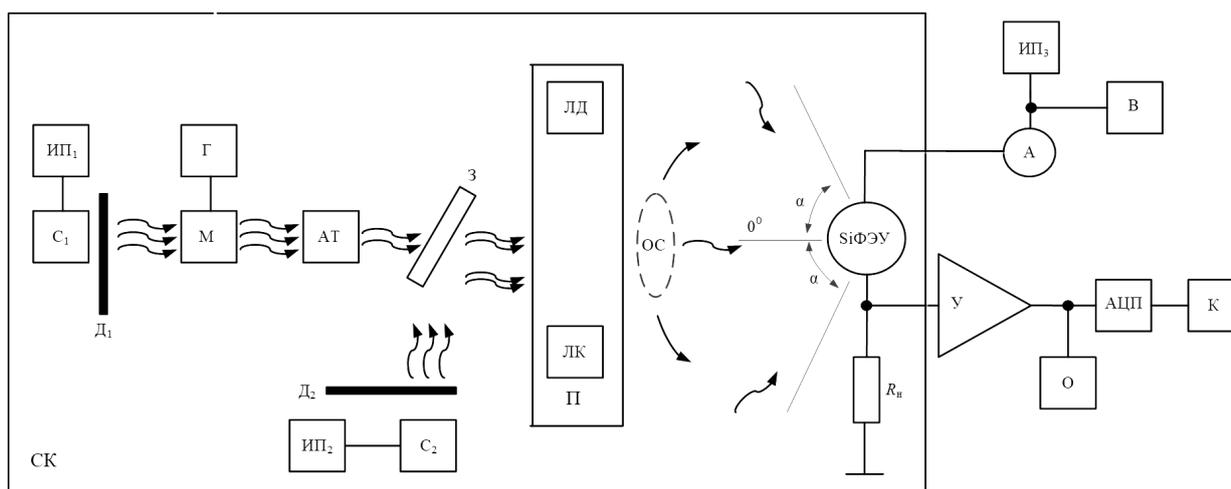


Рис. 1. Структурная схема экспериментальной установки: ИП<sub>1</sub>, ИП<sub>2</sub> и ИП<sub>3</sub> – источники постоянного напряжения; С<sub>1</sub>, С<sub>2</sub> – светодиоды; М – модулятор; Г – генератор; АТ – аттенюатор; З – зеркало; Д<sub>1</sub>, Д<sub>2</sub> – диафрагмы; П – подвижная платформа; ЛК – люксметр; ЛД – лазерный дозиметр; ОС – оптическая система; R<sub>н</sub> – нагрузка; SiФЭУ – кремниевый фотоэлектронный умножитель; У – усилитель; О – осциллограф; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; К – компьютер; А – амперметр; В – вольтметр; СК – светонепроницаемая камера

Fig. 1. Block diagram of the experimental setup: ИП<sub>1</sub>, ИП<sub>2</sub> и ИП<sub>3</sub> – constant voltage sources; С<sub>1</sub>, С<sub>2</sub> – LEDs; М – modulator; Г – generator; АТ – attenuator; З – mirror; Д<sub>1</sub>, Д<sub>2</sub> – diaphragms; П – movable platform; ЛК – lux meter; ЛД – laser dosimeter; ОС – optical system; R<sub>н</sub> – load; SiФЭУ – silicon photomultiplier tube; У – amplifier; О – oscilloscope; АЦП – analog-to-digital converter; К – computer; А – ammeter; В – voltmeter; СК – lightproof chamber

руется сигнальный импульс оптического излучения с заданной длиной волны, длительностью и энергетической экспозицией.

Измерение энергетической экспозиции оптического излучения сигнального импульса выполняется лазерным дозиметром (ЛД) при закрытой диафрагме  $D_2$ . Для этого ЛД устанавливается на пути распространения импульсного оптического излучения при помощи механической платформы (П).

Светодиод белого света ( $C_2$ ) применяется для имитации внешнего фонового оптического излучения. Питание этого светодиода осуществляется от источника постоянного напряжения (ИП<sub>2</sub>). Диафрагма ( $D_2$ ) применяется для перекрывания оптического излучения от  $C_2$ , поступающего на SiФЭУ.

Величина внешнего фонового оптического излучения определяется по создаваемой освещенности. Для определения освещенности, формируемой светодиодом  $C_2$ , используется люксметр (ЛК). Для этого люксметр с помощью платформы помещается на пути отраженного от полупрозрачного зеркала оптического излучения светодиода  $C_2$ .

Оптическая система (ОС) позволяет направлять оптическое излучение под разными углами относительно нормальной плоскости к фоточувствительной поверхности SiФЭУ в диапазоне от  $90^\circ$  до  $-90^\circ$ . Диаметр пучка полностью перекрывает фоточувствительную поверхность фотоприемника.

Для ограничения тока, протекающего через SiФЭУ, к нему последовательно подключается сопротивление нагрузки ( $R_n$ ), равное  $R_n = 1$  кОм. Выбранное значение сопротивления нагрузки обеспечивает формирование электрических импульсов, амплитуда которых превышает уровень шума усилителя (У).

Экспериментальная установка помещается в светонепроницаемую камеру (СК). Это необходимо для исключения воздействия на SiФЭУ излучения, создаваемого внешними источниками искусственного и естественного освещения.

При воздействии на SiФЭУ импульсов оптического излучения на сопротивлении нагрузки формируются электрические импульсы. Эти импульсы усиливаются в усилителе (У) и поступают для оцифровки на аналого-цифровой преобразователь (АЦП). Осциллограф (О) позволяет контролировать внешний вид электрических импульсов и определять их амплитуду. Оцифрованные значения электрических импульсов передаются в компьютер (К), где формируется массив данных об амплитудах этих импульсов. Программное обеспечение компьютера позволяет вычислять среднюю амплитуду электрических импульсов ( $U_{cp}$ ).

Питание SiФЭУ осуществляется от источника постоянного напряжения (ИП<sub>3</sub>). Напряжение питания SiФЭУ ( $U_{пит}$ ) контролируется вольтметром (В). Величина электрического тока, протекающего через SiФЭУ, измеряется амперметром (А).

Если обе диафрагмы ( $D_1$  и  $D_2$ ) закрыты, то на SiФЭУ не поступает оптическое излучение сигнальных импульсов и амперметр регистрирует темновой ток  $I_t$ . Если открыта только диафрагма  $D_1$ , то амперметр регистрирует общий ток  $I_0$ . Если  $D_1$  и  $D_2$  открыты, то амперметр регистрирует ток, обусловленный оптическим излучением сигнальных импульсов и внешним фоновым оптическим излучением ( $I_{об}$ ). Контроль этого тока проводится в целях предотвращения теплового пробоя исследуемых SiФЭУ.

Поскольку исследуемые SiФЭУ имеют различные напряжения пробоя ( $U_{пр}$ ), то для сравнения их характеристик между собой используется величина перенапряжения:  $\Delta U = U_{пит} - U_{пр}$ . Исследования выполнены в диапазоне перенапряжений от  $-0,5$  до  $1,0$  В. Для больших значений перенапряжений наблюдалось значительное увеличение темнового тока, что могло привести к тепловому пробую SiФЭУ. При меньших значениях перенапряжения коэффициент умножения SiФЭУ приблизительно равен единице. Напряжение пробоя определяется по вольт-амперной характеристике SiФЭУ [13].

Согласно ГОСТ 21934–83<sup>1</sup>, плоский угол зрения ( $\beta$ ) определяется как сумма двух углов, лежащих в нормальной плоскости к фоточувствительной поверхности SiФЭУ и отложенных со-

<sup>1</sup> ГОСТ 21934–83. Приемники излучения полупроводниковые фотоэлектрические и фотоприемные устройства. Термины и определения. URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4294831/4294831821.pdf> (дата обращения 09.10.2024).

ответственно с правой и левой сторон от оси, проведенной под углом  $\alpha = 0^\circ$  к такой плоскости. Углы соответствуют направлению пучков оптического излучения, при которых чувствительность становится равной нулю [14].

Если освещенность внешнего фонового оптического излучения превышает некоторое значение  $E_{\text{осл}}$ , то кремниевый фотоэлектронный умножитель перестает реагировать на какие-либо поступающие на него импульсы оптического излучения [4–6]. В этом случае считают, что фотоприемник ослеплен.

Все измерения выполнены при комнатной температуре  $T = 293$  К. Также при измерении плоского угла зрения удовлетворялись все требования по расходимости пучка оптического излучения и погрешности измерений, определенные ГОСТ Р 59607–2021<sup>1</sup>.

**Результаты измерений и их обсуждение.** При разных уровнях освещенности внешнего фонового оптического излучения  $E$  получены диаграммы направленности исследуемых фотоэлектронных умножителей в полярной системе координат для энергетической экспозиции, соответствующей максимальному значению  $H_{\text{max}}$  из их динамического диапазона (рис. 2). Для построения зависимости были выбраны три контрольные точки внешнего фонового оптического излучения в пределах от 0 до 40 лк, так как при 40 лк для КОФ5-1035 наступает ослепление фотоприемника [6]. Во время проведения измерений выбрана величина перенапряжения  $\Delta U = 0$  В, так как, согласно исследованиям [15], для такой величины перенапряжения отношение сигнал/шум исследуемых SiФЭУ принимает максимальное значение.

Диаграммы направленности, полученные для других исследуемых SiФЭУ при перенапряжении  $\Delta U = 0$  В и максимальном значении энергетической экспозиции  $H_{\text{max}}$  из их динамического диапазона, имели аналогичный вид. Исследование проводилось при значениях  $H_{\text{max}} = 1 \cdot 10^{-9}$ ;  $1,7 \cdot 10^{-9}$ ;  $3 \cdot 10^{-9}$  Дж/м<sup>2</sup> для Ketek PM 3325, ON Semi FC 30035 и КОФ5-1035 соответственно. Если оптическое излучение подавалось в нормальной плоскости к фоточувствительной поверх-

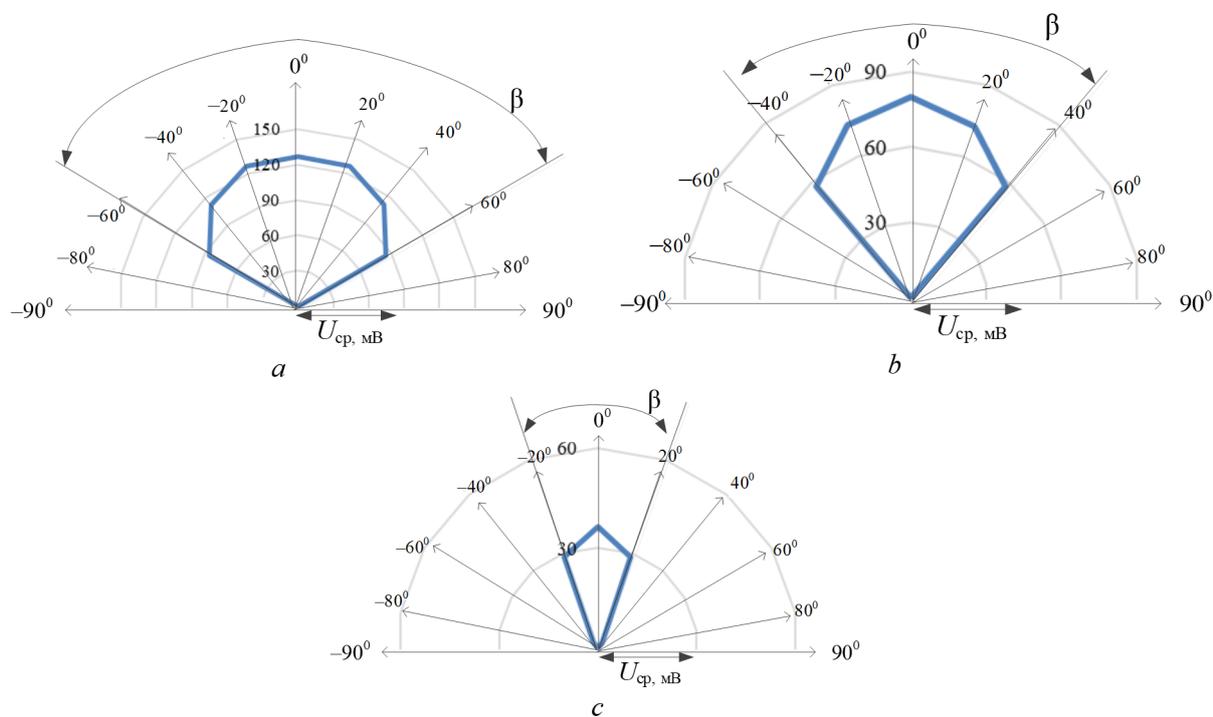


Рис. 2. Диаграмма направленности в полярной системе координат для КОФ5-1035:  
*a* – при  $E = 0$  лк; *b* –  $E = 12$  лк; *c* –  $E = 32$  лк

Fig. 2. Radiation pattern in the polar coordinate system for KOF5-1035: *a* – at  $E = 0$  lux; *b* –  $E = 12$  lux; *c* –  $E = 32$  lux

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

ности, то увеличение уровня внешнего фонового оптического излучения  $E$  приводило к снижению амплитуд импульсов. Так, для КОФ5-1035  $U_{cp} = 127; 80$  и  $36$  мВ при  $E = 0; 12$  и  $32$  лк соответственно. Для Ketek PM 3325 и ON Semi FC 30035 при тех же условиях  $U_{cp} = 376; 301$  и  $226$  мВ и  $U_{cp} = 303; 212$  и  $152$  мВ соответственно.

С увеличением уровня внешнего фонового оптического излучения  $E$  диаграмма направленности сужалась и уменьшался плоский угол зрения  $\beta$  (см. таблицу).

**Плоский угол зрения SiФЭУ при изменении внешнего фонового оптического излучения**  
**The flat angle of view of the SiPMs when changing the external background optical radiation**

Модель кремниевого фотозлектронного умножителя Silicon Photomultiplier Model	Плоский угол зрения $\beta$ при заданном уровне освещенности $E$ Flat angle of view $\beta$ at a given light level $E$			$E_{осл},$ лк $E_{осл},$ lux
	$E = 0$ лк $E = 0$ lux	$E = 12$ лк $E = 12$ lux	$E = 32$ лк $E = 32$ lux	
КОФ5-1035	120°	80°	40°	40
Ketek PM 3325	160°	140°	100°	100
ON Semi FC 30035	160°	120°	80°	80

Таким образом, наибольшее значение плоского угла зрения было получено для Ketek PM 3325, а наименьшее – для КОФ5-1035, что связано с конструкцией корпуса второй модели (корпус содержит бортик вокруг фоточувствительной площадки в отличие от других исследуемых SiФЭУ).

Отличие величины  $\beta$  для Ketek PM 3325 и ON Semi FC 30035 с увеличением внешнего фонового оптического излучения обусловлено тем, что ослепление фотозлектронных умножителей первой модели наступает при более высоких значениях  $E$ .

Уменьшение амплитуды импульсов при наличии внешнего фонового оптического излучения объясняется тем, что увеличение уровня внешнего фонового оптического излучения инициирует рост количества неосновных носителей в областях пространственного заряда и умножения SiФЭУ [16]. Это приводит к понижению величины электрического поля в этих областях и, как следствие, к уменьшению коэффициента умножения носителей заряда, а значит, и средней амплитуды электрических импульсов  $U_{cp}$ .

Среднее значение амплитуды импульсов при максимальном угле отклонения пучка оптического излучения от нормали, проведенной к поверхности SiФЭУ, снижается на 39 % для КОФ5-1035, на 20 % – для Ketek PM 3325 и на 18 % – для ON Semi FC 30035 [17]. Уменьшение энергетической экспозиции в пределах динамического диапазона приводит к пропорциональному уменьшению амплитуды импульсов. Плоский угол зрения  $\beta$  при снижении энергетической экспозиции оставался неизменным до значений  $0,39H_{max}$ ,  $0,20H_{max}$  и  $0,22H_{max}$  для КОФ5-1035, Ketek PM 3325 и ON Semi FC 30035 соответственно. При более низких значениях энергетической экспозиции плоский угол зрения  $\beta$  уменьшался с понижением энергетической экспозиции практически до нуля.

На рис. 3 представлены зависимости плоского угла зрения для исследуемых SiФЭУ от внешнего фонового оптического излучения. Данные зависимости получены при перенапряжении  $\Delta U = 0$  В и энергетической экспозиции оптического излучения импульса, соответствующей максимальному значению из динамического диапазона исследуемых SiФЭУ. Видно, что при отсутствии внешнего фонового оптического излучения ( $E = 0$  лк) плоский угол зрения  $\beta = 120^\circ$  для КОФ5-1035 и  $\beta = 160^\circ$  для Ketek PM 3325 и ON Semi FC 30035 [14]. Значение  $\beta$  уменьшается до нуля в диапазоне изменения  $E$  от 0 до 40 лк для КОФ5-1035, от 0 до 80 лк – для ON Semi FC 30035 и от 0 до 100 лк – для Ketek PM 3325. В указанном диапазоне внешнего фонового оптического излучения зависимость  $\beta(E)$  имеет характер, близкий к линейному. Для ее количественной характеристики используем величину  $\Delta\beta/\Delta E$ , где  $\Delta\beta$  – изменение плоского угла зрения при изменении внешнего фонового оптического излучения  $\Delta E$ . Тогда оценка этой величины  $\Delta\beta/\Delta E = 3,0; 2,0$  и  $1,6$  градус/лк для КОФ5-1035, ON Semi FC 30035 и Ketek PM 3325. Таким образом, зависимость  $\beta(E)$  для КОФ5-1035 проявляется сильнее, чем для Ketek PM 3325 и ON Semi FC 30035. Это можно объяснить различием их конструктивных особенностей.

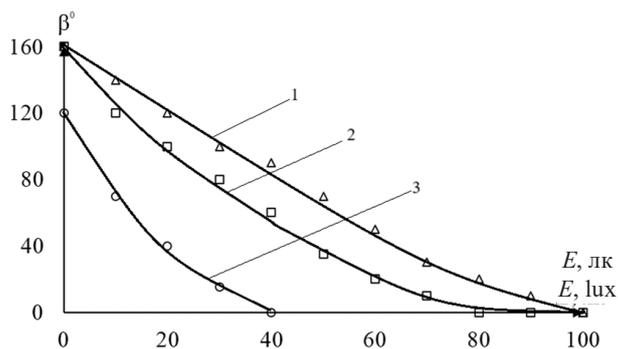


Рис. 3. Зависимость плоского угла зрения от внешнего фонового оптического излучения: кривая 1 – Ketek PM 3325; кривая 2 – ON Semi FC 30035; кривая 3 – КОФ5-1035

Fig. 3. Dependence of the plane viewing angle on external background optical radiation: curve 1 – Ketek PM 3325; curve 2 – ON Semi FC 30035; curve 3 – КОФ5-1035

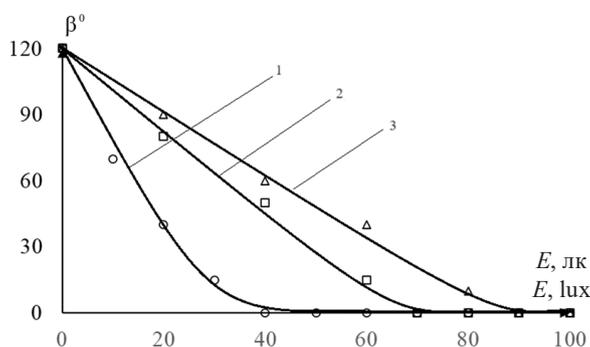


Рис. 4. Зависимость плоского угла зрения от внешнего фонового оптического излучения для КОФ5-1035: кривая 1 – при  $\Delta U = 0$  В; кривая 2 – при  $\Delta U = 0,5$  В; кривая 3 – при  $\Delta U = 1,0$  В

Fig. 4. Dependence of the plane viewing angle on external background optical radiation for КОФ5-1035: curve 1 – at  $\Delta U = 0$  V; curve 2 – at  $\Delta U = 0.5$  V; curve 3 – at  $\Delta U = 1.0$  V

На рис. 4 представлена типичная зависимость плоского угла зрения от внешнего фонового оптического излучения для фотозлектронного умножителя КОФ5-1035 при различных перенапряжениях. Для других исследуемых SiФЭУ эта зависимость аналогична. Из рис. 4 видно, что возрастание перенапряжения приводит к увеличению внешнего фонового оптического излучения  $E$ , при котором угол  $\beta$  становится равным нулю. Поскольку представленная зависимость также близка к линейной, то для КОФ5-1035 оценка величины  $\Delta\beta/\Delta E = 3,0; 1,7$  и  $1,3$  градус/лк для  $\Delta U = 0; 0,5$  и  $1,0$  В соответственно. Для ON Semi FC 30035 и Ketek PM 3325 значение  $\Delta\beta/\Delta E = 2,0; 1,1; 0,9$  градус/лк и  $\Delta\beta/\Delta E = 1,6; 0,9$  и  $0,7$  градус/лк при  $\Delta U = 0; 0,5$  и  $1,0$  В соответственно. Таким образом, изменение внешнего фонового оптического излучения оказывает меньшее влияние на изменение плоского угла зрения при больших перенапряжениях.

Как следует из зависимостей, представленных на рис. 5, при ослеплении SiФЭУ восстановить величину плоского угла зрения можно путем увеличения перенапряжения. В частности, видно, что для КОФ5-1035 при условии полного ослепления при  $\Delta U = 0$  В и  $E = 40$  лк путем повышения перенапряжения до  $\Delta U = 1,0$  В можно обеспечить частичное восстановление плоского угла зрения до  $100^\circ$ , то есть до 83 % его первоначального значения при  $\Delta U = 0$  В и  $E = 0$  лк. Для ON Semi FC 30035 и Ketek PM 3325 при таком же перенапряжении значение плоского угла зрения можно восстановить до  $150^\circ$  и  $160^\circ$ , или до 94 % и 100 % его значения, полученного при  $\Delta U = 0$  В и  $E = 0$  лк, соответственно. Полностью восстановить воздействие внешнего фонового оптического излучения в 40 лк для КОФ5-1035 удастся при  $\Delta U = 1,6$  В, а для ON Semi FC 30035 – при  $\Delta U = 1,1$  В. Следует отметить, что соответствующее увеличение перенапряжения приводит

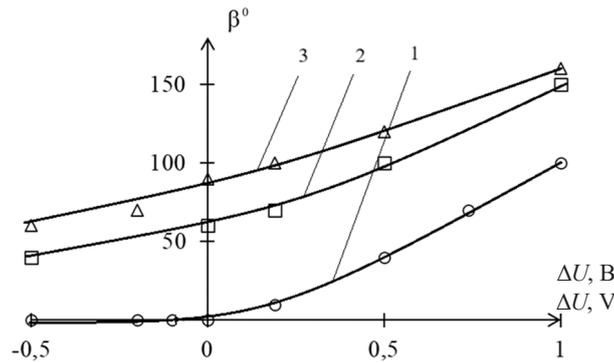


Рис. 5. Зависимость плоского угла зрения от перенапряжения при уровне внешнего фонового оптического излучения, равном 40 лк: кривая 1 – КОФ5-1035; кривая 2 – ON Semi FC 30035; кривая 3 – Ketek PM 3325

Fig. 5. Dependence of the plane angle of view on overvoltage at a level of external background optical radiation of 40 lux: curve 1 – KOF5-1035; curve 2 – ON Semi FC 30035; curve 3 – Ketek RM 3325

к повышению тока  $I_{\text{ов}}$  до значений 250 мкА для КОФ5-1035, 300 мкА – для ON Semi FC 30035, что при долгой эксплуатации может привести к тепловому пробую этих фотоприемников.

Восстановить величину плоского угла зрения можно также при использовании светофильтра с полосой пропускания  $470 \pm 20$  нм. Полностью восстановить значение плоского угла зрения до  $160^\circ$  для Ketek PM 3325 и ON Semi FC 30035 и до  $120^\circ$  для КОФ5-1035 можно при  $\Delta U = 0$  В и уровне внешнего фонового оптического излучения в 100 лк.

Восстановить плоский угол зрения при значении освещенности внешнего фонового оптического излучения 500 лк удастся при сочетании наличия светофильтра и повышения перенапряжения до  $\Delta U = 0,8$  В для Ketek PM 3325 и ON Semi FC 30035 и до  $\Delta U = 1,0$  В – для КОФ5-1035. При этом величина фототока составила 97 мкА для ON Semi FC 30035, 120 мкА – для Ketek PM 3325 и 86 мкА – для КОФ5-1035.

Нами определено, что максимальное значение освещенности, при котором существовала возможность восстановить величину плоского угла зрения до первоначального значения, составило 3000 лк. Этого удалось достигнуть при использовании светофильтра с полосой пропускания  $470 \pm 20$  нм и перенапряжениях  $\Delta U = 1,6; 1,8; 2,1$  В для Ketek PM 3325, ON Semi FC 30035 и КОФ5-1035 соответственно. Однако при таких условиях эксплуатация SiФЭУ сопровождается высокими токами для всех исследуемых фотоприемников:  $I_{\text{ов}} = 300; 350$  и 410 мкА для КОФ5-1035, ON Semi FC 30035 и Ketek PM 3325 соответственно, что может привести к их тепловому пробую и дальнейшей непригодности для работы.

**Заключение.** Установлено, что с увеличением уровня освещенности внешнего фонового оптического излучения диаграмма направленности SiФЭУ сужается. Это связано с уменьшением плоского угла зрения. Зависимость величины плоского угла зрения от уровня освещенности для КОФ5-1035 проявляется сильнее чем для Ketek PM 3325 и ON Semi FC 30035.

Показано, что восстановить плоский угол зрения до первоначального значения при  $\Delta U = 0$  В и  $E = 0$  лк возможно путем повышения перенапряжения и использованием светофильтра с полосой пропускания  $470 \pm 20$  нм.

Максимальное значение освещенности, при котором существовала возможность восстановить величину плоского угла зрения до первоначального значения, составляла 3000 лк для всех исследуемых SiФЭУ.

Полученные результаты представляют собой потенциально ценный ресурс для разработки и совершенствования оптических систем связи общего доступа.

#### Список использованных источников

1. Open optical communication systems at a hyperscale operator / M. Newland, R. Schmogrow, M. Cantono [et al.] // Journal of Optical Communications and Networking. – 2020. – Vol. 12, № 6. – P. 50–58. <https://doi.org/10.1364/JOCN.381897>
2. Perwej, Y. The Next Generation of Wireless Communication Using Li-Fi (Light Fidelity) Technology / Y. Perwej // Journal of Computer Networks. – 2017. – Vol. 4, № 1. – P. 20–29. <https://doi.org/10.12691/jcn-4-1-3>

3. Abisayo, A. *Optically Amplified Free-space Optical Communication Systems* / A. Abisayo. – University of Nottingham, 2013. – 209 p. – URL: <https://eprints.nottingham.ac.uk/13304/1/AladelobaAbisayoThesis.pdf> (date of access 25.09.2024)
4. *Quantum Communications and Cryptography* / ed. A. V. Sergienko. – CRC press, 2019. – 248 p. <https://doi.org/10.1201/9781315221120>
5. Secure quantum key distribution with realistic devices / Feihu Xu, Xiongfeng Ma, Qiang Zhang [et al.] // *Reviews of Modern Physics*. – 2020. – Vol. 92. – Art. ID 025002. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.92.025002>
6. Регистрация оптического излучения переменной интенсивности в режиме счета фотонов лавинным фотодиодом / И. Р. Гулаков, А. О. Зеневич, О. В. Кочергина [и др.] // *Оптический журнал*. – 2021. – Т. 88, № 11. – С. 9–15. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2021-88-11-09-15>
7. Silicon photomultiplier current and prospective applications in biological and radiological photonics / M. Stagliano, L. Abegão, A. Chiericia, F. d'Erricoa // *EPH – International Journal of Science and Engineering*. – 2018. – Vol. 4, Iss. 10. – P. 10–29. <https://doi.org/10.53555/eijse.v4i4.143>
8. Кремниевый фотоэлектронный умножитель. Новые возможности / С. Клемин, Ю. Кузнецов, Л. Филатов [и др.] // *Электроника: Наука, Технология, Бизнес*. – 2007. – № 8. – С. 80–86.
9. Special Issue on: Optical Wireless Communications for Emerging Connectivity Requirements / Mohammad Ali Khalighi, Zabih Ghassemloooy, M.-S. Alouini [et al.] // *IEEE Open Journal of the Communications Society*. – 2021. – Vol. 2. – P. 82–86. <https://doi.org/10.1109/OJCOMS.2020.3045818>
10. Гулаков, И. Р. Спектральные характеристики кремниевых фотоэлектронных умножителей / И. Р. Гулаков, А. О. Зеневич, О. В. Кочергина // *Успехи прикладной физики*. – 2021. – Т. 9, № 2. – С. 164–171. <https://doi.org/10.51368/2307-4469-2021-9-2-164-171>
11. Ландсберг, Г. С. Оптика: учеб. пособие для вузов / Г. С. Ландсберг. – 6-е изд., стер. – М.: Физматлит, 2003. – 848 с.
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>
13. Гулаков, И. Р. Фотоприемники квантовых систем / И. Р. Гулаков, А. О. Зеневич. – Минск: УО ВГКС, 2012. – 276 с.
14. Гулаков И. Р. Плоский угол зрения / И. Р. Гулаков, А. О. Зеневич, О. В. Кочергина // *Известия вузов. Электроника*. – 2023. – Т. 28, № 3. – С. 360–367. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-3-360-367>
15. Асаёнок, М. А. Работа кремниевых фотоэлектронных умножителей со структурой  $p^+p-n^+$  в режиме одно-квантовой регистрации / М. А. Асаёнок, А. О. Зеневич, О. В. Кочергина [и др.] // *Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук*. – 2020. – Т. 65, № 3. – С. 349–356. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-3-349-356>
16. Асаёнок, М. А. Исследование характеристик кремниевых фотоэлектронных умножителей / М. А. Асаёнок, А. О. Зеневич // *Прикладная физика*. – 2018. – № 6. – С. 49–53.
17. Гулаков, И. Р. Влияние угла освещения на выходные параметры кремниевого фотоумножителя / И. Р. Гулаков, А. О. Зеневич, О. В. Кочергина // *Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук*. – 2023. – Т. 68, № 4. – С. 344–352. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-4-344-352>

## References

1. Newland M., Schmogrow R., Cantono M., Vusirikala V., Hofmeister T. Open optical communication systems at a hyperscale operator. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2020, vol. 12, no. 6, pp. 50–58. <https://doi.org/10.1364/JOCN.381897>
2. Perwej Y. The Next Generation of Wireless Communication Using Li-Fi (Light Fidelity) Technology. *Journal of Computer Networks*, 2017, vol. 4, no. 1, pp. 20–29. <https://doi.org/10.12691/jcn-4-1-3>
3. Abisayo A. *Optically Amplified Free-space optical Communication Systems*. University of Nottingham, 2013. 209 p. Available at: <https://eprints.nottingham.ac.uk/13304/1/AladelobaAbisayoThesis.pdf> (accessed 25.09.2024).
4. Sergienko A. V., ed. *Quantum Communications and Cryptography*. CRC press, 2019. 248 p. <https://doi.org/10.1201/9781315221120>
5. Feihu Xu, Xiongfeng Ma, Qiang Zhang, Hoi-Kwong Lo, Jian-Wei Pan. Secure quantum key distribution with realistic devices. *Reviews of Modern Physics*, 2020, vol. 92, art. ID 025002. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.92.025002>
6. Gulakov I. R., Zenevich A. O., Kochergina O. V., Novikov E. V., Goibov S. A. Detection of variable-intensity optical emission using an avalanche photodiode in photon-counting mode. *Journal of Optical Technology*, 2021, vol. 88, no. 11, pp. 620–624. <https://doi.org/10.1364/JOT.88.000620>
7. Stagliano M., Abegão L., Chiericia A., d'Errico F. Silicon photomultiplier current and prospective applications in biological and radiological photonics. *EPH – International Journal of Science and Engineering*, 2018, vol. 4, iss.10, pp. 10–29. <https://doi.org/10.53555/eijse.v4i4.143>
8. Klemin S., Kuznetsov Yu., Filatov L., Buzhan P., Dolgoshein B., Il'in A., Popova E. Silicon photomultiplier. New opportunities. *Elektronika: Nauka, Tekhnologiya, Biznes* [Electronics: Science, Technology, Business], 2007, no. 8, pp. 80–86 (in Russian).
9. Khalighi M. A., Zabih G., Alouini M.-S., Hranilovic S., Zvanovec S. Special Issue on: Optical Wireless Communications for Emerging Connectivity Requirements. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 2021, vol. 2, pp. 82–86. <https://doi.org/10.1109/OJCOMS.2020.3045818>

10. Gulakov I. R., Zenevich A. O., Kochergina O. V. Investigation of the spectral characteristics of silicon photomultiplier tubes. *Uspekhi prikladnoi fiziki* [Advances in Applied Physics], 2021, vol. 9, no. 2, pp. 164–171 (in Russian). <https://doi.org/10.51368/2307-4469-2021-9-2-164-171>
11. Landsberg G. S. *Optics*. 6<sup>th</sup> ed. Moscow, Fizmatlit Publ., 2003. 848 p. (in Russian).
12. Zenevich A. O., Kochergina O. V. Study of the dynamic range of silicon photomultipliers. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektronika = Proceedings of Universities. Electronics*, 2021, vol. 26, no. 1, pp. 30–39 (in Russian). <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2021-26-1-30-39>
13. Gulakov I. R., Zenevich A. O. *Photodetectors of Quantum Systems*. Minsk, Higher State College of Communications Publ., 2012. 276 p. (in Russian).
14. Gulakov I. R., Zenevich A. O., Kochergina O. V. Flat angle of view. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektronika = Proceedings of Universities. Electronics*, 2023, vol. 28, no. 3, pp. 360–367 (in Russian). <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-3-360-367>
15. Asayonok M. A., Zenevich A. O., Kochergina O. V., Novikov E. V., Soroka S. A. Operation of silicon photomultipliers with  $p^+ - p - n^+$  structure in single-quantum registration mode. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2020, vol. 65, no. 3, pp. 349–356 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-3-349-356>
16. Asayonok M. A., Zenevich A. O. Study of the characteristics of silicon photomultipliers. *Prikladnaya fizika = Applied Physics*, 2018, no. 6, pp. 49–53 (in Russian).
17. Gulakov I. R., Zenevich A. O., Kochergina O. V. Influence of illumination angle on the output parameters of a silicon photomultiplier. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2023, vol. 68, no. 4, pp. 344–352 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-4-344-352>