

ISSN 1561-8358 (Print)  
ISSN 2524-244X (Online)**РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ**  
**RADIOELECTRONICS, INSTRUMENT-MAKING**<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-4-344-352>  
УДК 621.383.92Оригинальная статья**И. Р. Гулаков, А. О. Зеневич, О. В. Кочергина\****Белорусская государственная академия связи,  
ул. Ф. Скорины, 8/2, 220114, Минск, Республика Беларусь***ВЛИЯНИЕ УГЛА ОСВЕЩЕНИЯ НА ВЫХОДНЫЕ ПАРАМЕТРЫ  
КРЕМНИЕВОГО ФОТОУМНОЖИТЕЛЯ**

**Аннотация.** Исследовано влияние напряжения питания на величину фотосигнала и отношение сигнал/шум при изменении угла падения оптического излучения на фоточувствительную поверхность кремниевых фотоумножителей Ketek PM 3325, ON Semi FC 30035 и КОФ5-1035. Приведена схема установки и методика исследования. Выполнены измерения зависимостей величины фотосигнала исследуемых фотоприемников от величины перенапряжения, определены значения отношения сигнал/шум. Установлено, что плоский угол зрения кремниевых фотоумножителей зависит от напряжения питания фотоприемника. Приведены диаграммы изменения величины фотосигнала от углов падения оптического излучения на фоточувствительную поверхность фотоприемников. Установлено, что для напряжений питания, превышающих напряжение пробоя не более чем на 1 В, наблюдается уменьшение фотосигнала в пределах плоского угла зрения до уровня 60 % от его максимального значения для КОФ5-1035 и до уровня 80 % для Ketek PM 3325 и ON Semi FC 30035. Получены зависимости отношения сигнал/шум от угла падения оптического излучения на фоточувствительную поверхность при различных перенапряжениях. Результаты данной статьи могут найти применение при разработке и конструировании приборов и устройств для регистрации оптического излучения на основе кремниевых фотоумножителей.

**Ключевые слова:** кремниевый фотоумножитель, фотосигнал, угол падения оптического излучения, плоский угол зрения, отношение сигнал/шум

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

**Информация об авторах:** *Гулаков Иван Романович* – доктор физико-математических наук, профессор кафедры физических и математических основ информатики Белорусской государственной академии связи. E-mail: gulakov@bsu.by; *Зеневич Андрей Олегович* – доктор технических наук, профессор, ректор Белорусской государственной академии связи. E-mail: a.zenevich@bsac.by; *Кочергина Ольга Викторовна\** – преподаватель кафедры радио- и информационных технологий Белорусской государственной академии связи. E-mail: o.kochergina@bsac.by

**Вклад авторов:** *Гулаков Иван Романович* – обоснование концепции, разработка дизайна экспериментального исследования, интерпретация результатов исследования, редактирование текста рукописи; *Зеневич Андрей Олегович* – обоснование концепции, разработка дизайна экспериментального исследования, планирование исследования, обобщение результатов исследования, формулировка выводов, редактирование текста рукописи; *Кочергина Ольга Викторовна* – планирование и проведение инструментальных исследований, систематизация данных, написание текста рукописи, работа с графическим материалом, отслеживание воспроизводимости результатов.

**Для цитирования:** Гулаков, И. Р. Влияние угла освещения на выходные параметры кремниевого фотоумножителя / И. Р. Гулаков, А. О. Зеневич, О. В. Кочергина // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2023. – Т. 68, № 4. – С. 344–352. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-4-344-352>

*Поступила в редакцию: 17.04.2023*

*Доработанный вариант: 22.08.2023*

*Утверждена к публикации: 07.09.2023*

*Подписана в печать: 15.12.2023*

*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 ILLUMINATION ANGLE ON THE OUTPUT PARAMETERS  
OF A SILICON PHOTOMULTIPLIER**

**Abstract.** The influence of supply voltage on the photosignal value and signal-to-noise ratio has been studied while changing the incidence angle of optical radiation on the photosensitive surface of Ketek PM 3325, ON Semi FC 30 035, and KOF5-1035 silicon photomultipliers. A scheme of the installation and a research technique are given. An installation scheme and a research technique have been given. The magnitude of the photosignal of the studied photodetectors was measured as a function of the magnitude of the overvoltage, and the signal-to-noise ratios were determined. The photosignal values of the studied photodetectors have been conducted as a function of overvoltage value, and the signal-to-noise ratios have been determined. It has been established that a flat vision angle of silicon photomultipliers depends on the photodetector supply voltage. Diagrams of changing the photosignal values from the incidence angles of optical radiation on the photosensitive surface of photodetectors have been given. It has been found that at supply voltages exceeding the breakdown voltage by no more than 1 V, the maximum deviation of the incidence angle of optical radiation on the photosensitive surface of silicon photomultipliers within a flat vision angle leads to a decrease in the signal-to-noise ratio to at least 60 % of the maximum value for KOF5-1035 and not more than 80 % for Ketek PM 3325 and ON Semi FC 30 035. The dependences of the signal-to-noise ratio on incidence angle of optical radiation on a photosensitive surface for various overvoltages have been given. The results of this article can be applied in the development and design of instruments and devices for detecting optical radiation based on silicon photomultipliers.

**Keywords:** silicon photomultiplier, photosignal, incidence angle of optical radiation, a flat vision angle, signal-to-noise ratio

**Conflict of interest:** the authors declare that there is no conflict of interest.

**Information about the authors:** *Ivan R. Gulakov* – Dr. Sci (Physics and Mathematics), Professor of the Department of Physical and Mathematical Foundations of Informatics at Belarusian State Academy of Communications. E-mail: gulakov@bsu.by; *Andrey O. Zenevich* – Dr. Sci. (Engineering), Professor, Rector at Belarusian State Academy of Communications. E-mail: a.zenevich@bsac.by; *Olga V. Kochergina* – Lecturer at the Department of Radio and Information Technologies at Belarusian State Academy of Communications. E-mail: o.kochergina@bsac.by

**Contribution of the authors:** *Ivan R. Gulakov* – justification of the concept, development of the design of an experimental study, interpretation of the results, editing of the manuscript text; *Andrey O. Zenevich* – justification of the concept, development of the design of an experimental study, planning of the investigations, generalization of the research results, formulation of conclusions, editing of the manuscript text; *Olga V. Kochergina* – planning and conducting of the instrumental research, systematization of data, writing and editing of the manuscript text, working with graphic material, tracking the reproducibility of the results.

**For citation:** 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>

*Received: 17.04.2023*

*Modified version: 22.08.2023*

*Approved for publication: 07.09.2023*

*Signed to the press: 15.12.2023*

**Введение.** В настоящее время в науке и технике широко применяются различного рода устройства на основе фотоприемников: открытые системы оптической связи для передачи данных, лидары при контроле загрязнения воздуха и водных сред, оптические устройства для регистрации сигналов, поступающих от различного рода астрономических объектов [1–3]. Одними из наиболее перспективных фотоприемников для использования в таких системах и устройствах являются матричные многоэлементные лавинные фотоприемники – кремниевые фотоэлектронные умножители (Si-ФЭУ) [4–6]. Это связано с тем, что Si-ФЭУ обладают рядом преимуществ перед другими типами фотоприемников, применяемых в данных системах и устройствах, – электровакуумными фотоэлектронными умножителями и одноэлементными лавинными фотодиодами. Так, при сравнении с электровакуумными фотоэлектронными умножителями они более компактны, нечувствительны к магнитным полям, имеют меньшие напряжения питания, хорошее временное разрешение, более высокую механическую прочность и лучшую чувствительность в видимой области спектра. В сравнении с одноэлементными лавинными фотодиодами

Si-ФЭУ имеют более высокий коэффициент усиления, слабую чувствительность коэффициента усиления к изменению температуры и напряжения питания и большие площади фоточувствительной поверхности.

Одной из значимых характеристик фотоприемников, применяемых в вышеуказанных системах и устройствах, является плоский угол зрения – угол между нормальной плоскостью к фоточувствительной поверхности фотоприемника и направлением падения параллельного пучка оптического излучения, при котором величина фотосигнала уменьшается до заданного уровня (ГОСТ Р 59 605-2021 «Оптика и фотоника. Приемники излучения полупроводниковые. Фотоэлектрические и фотоприемные устройства. Термины и определения». М.: Рос. ин-т стандартизации, 2021). Знание этого параметра важно для оптических систем, в которых оптическое излучение может поступать на фотоприемник не только нормально к его фоточувствительной поверхности, но и под различными углами.

Однако значение плоского угла зрения для выпускаемых промышленностью Si-ФЭУ не определяется. Также не установлено, каким образом угол падения оптического излучения на фоточувствительную поверхность Si-ФЭУ влияет на отношение сигнал/шум на выходе этого фотоприемника. Все это и определило цель этой работы.

**Экспериментальная установка и методика измерений.** В качестве объектов исследований выбраны серийно выпускаемые Si-ФЭУ КОФ5-1035, Ketek PM 3325 и ON Semi FC 30 035, поскольку они имеют близкую структуру и параметры.

На рис. 1 представлена структурная схема экспериментальной установки для проведения исследований.

В качестве источника оптического излучения используется светодиод (СД) с длиной волны  $\lambda = 470$  нм, соответствующей максимальной чувствительности Si-ФЭУ [7]. Питание светодиода осуществляется от генератора прямоугольных электрических импульсов (ИП1), длительность которых составляет 1 мкс, а частота следования  $10^4$  Гц. При такой частоте следования импульсов удастся избежать влияния явлений, возникающих в Si-ФЭУ после окончания регистрации одного оптического импульса, на процесс регистрации следующего за ним другого оптического импульса. Импульс оптического излучения поступает на вход аттенюатора (АТ), который позволяет

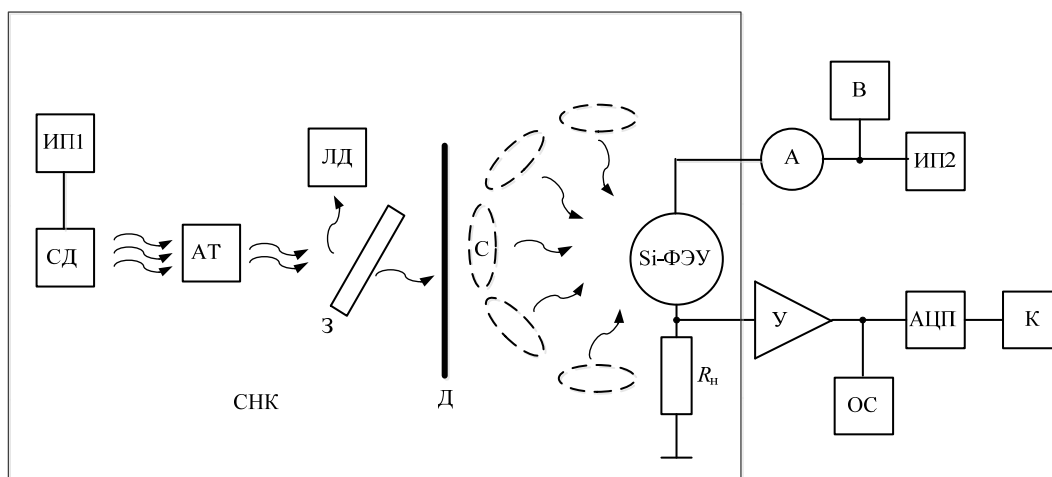


Рис. 1. Структурная схема экспериментальной установки: ИП1 и ИП2 – источники питания светодиода и фотоприемника соответственно; С – оптическая система; АТ – аттенюатор; А – амперметр; В – вольтметр; Si-ФЭУ – кремниевый фотоэлектронный умножитель; ЛД – дозиметр оптического излучения; З – полупрозрачное зеркало; У – усилитель; Д – диафрагма;  $R_n$  – сопротивление нагрузки; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; К – компьютер; ОС – осциллограф; СНК – светонепроницаемая камера; СД – светодиод

Fig. 1. Block diagram of the experimental setup: ИП1 and ИП2 – power supply of the optical system and photodetector, respectively; С – optical system; М – modulator; Г – generator; АТ – attenuator; А – ammeter; В – voltmeter; Si-ФЭУ – silicon photoelectron multiplier; ЛД – optical radiation dosimeter; З – translucent mirror; У – amplifier; Д – diaphragm;  $R_n$  – load resistance; АЦП – analog-to-digital converter; К – computer; ОС – oscilloscope; СНК – light-tight camera; СД – light-emitting diode

ослабить энергетическую экспозицию излучения от  $10^{-8}$  до  $10^{-11}$  Дж/м<sup>2</sup>. При таких экспозициях оптического излучения обеспечивается работа исследуемых фотоприемников в пределах их динамического диапазона. С выхода аттенюатора излучение подается на полупрозрачное зеркало (З), пропускающее 50 % излучения, которое поступает через диафрагму на Si-ФЭУ, а 50 % излучения зеркало отражает на лазерный дозиметр (ЛД), который измеряет энергетическую экспозицию оптического излучения. На Si-ФЭУ от источника питания (ИП2) подается напряжение питания  $U_{\text{пит}}$ , которое контролируется вольтметром (В). Последовательно с Si-ФЭУ включен резистор нагрузки ( $R_{\text{н}}$ ). При регистрации импульсов оптического излучения изменяется протекающий через Si-ФЭУ электрический ток, в результате чего на резисторе нагрузки формируются импульсы напряжения. Эти импульсы усиливаются усилителем (У) и оцифровываются аналого-цифровым преобразователем (АЦП), а данные передаются в компьютер (К). Вид этих импульсов на выходе усилителя контролируется осциллографом (ОС). Вычисления средней амплитуды импульсов напряжения  $\langle U_{\text{п}} \rangle$  и их среднего квадратичного отклонения  $\sigma$  выполняются с помощью стандартного программного обеспечения на основе статистического анализа 100 импульсов. Средняя амплитуда импульсов напряжения  $\langle U_{\text{п}} \rangle$  является величиной фотосигнала.

При закрытой диафрагме (Д) поступление импульсов оптического излучения на фотоприемник прекращается. Светонепроницаемая камера (СНК) обеспечивает защиту Si-ФЭУ от внешнего оптического излучения.

Оптическая система (С) позволяет направлять излучение под разными углами  $\alpha$  относительно нормальной плоскости к фоточувствительной поверхности Si-ФЭУ. Угол  $\alpha$  можно изменять от  $90^\circ$  до  $-90^\circ$ . Система формирует такой диаметр пучка оптического излучения, при котором пятно этого оптического излучения полностью покрывает квадратные фоточувствительные поверхности исследуемых Si-ФЭУ.

Плоский угол зрения  $\beta$  определяется как сумма двух углов  $\alpha$ , лежащих в нормальной плоскости к фоточувствительной поверхности Si-ФЭУ и отложенных соответственно с правой и левой сторон от оси, проведенной под углом  $0^\circ$  к такой плоскости. Углы  $\alpha$  соответствуют направлению пучков оптического излучения, при которых фотосигнал становится равным нулю (рис. 2, с).

Геометрия расположения Si-ФЭУ в эксперименте такая, что расстояние  $l$  от выхода оптической системы до его фоточувствительной поверхности удовлетворяет условию (ГОСТ Р 59 607-2021 «Оптика и фотоника. Приемники излучения полупроводниковые. Фотоэлектрические и фотоприемные устройства. Методы измерений фотоэлектрических параметров и определения характеристик»). М.: Рос. ин-т стандартизации, 2021)

$$\frac{A}{l} \leq 0,01, \quad (1)$$

где  $A$  – длина стороны квадрата фоточувствительной поверхности.

Отношение сигнал/шум на выходе Si-ФЭУ определялось по следующей формуле [8]:

$$\rho = \frac{U_{\text{п}}^2}{2\sigma^2}. \quad (2)$$

Поскольку исследуемые Si-ФЭУ имеют разные напряжения пробоя  $U_{\text{пр}}$ , то для сравнения их характеристик используется перенапряжение, определяемое как  $\Delta U = U_{\text{пит}} - U_{\text{пр}}$ . Напряжение пробоя исследуемых фотоприемников составило  $U_{\text{пр}} = 24,7; 27,0$  и  $30,0$  В для ON Semi FC 30 035, Ketek PM 3325 и КОФ5-1035 соответственно. Напряжение пробоя определялось по вольт-амперной характеристике Si-ФЭУ при закрытой диафрагме по методике, описанной в [9].

Все измерения проводились при комнатной температуре  $T = 293$  К в диапазоне перенапряжений  $\Delta U = (-0,5 \div 1)$  В. Диапазон исследуемых перенапряжений ограничивался малыми коэффициентами усиления, с одной стороны, и большими значениями темновых токов – с другой. Также при измерении плоского угла зрения удовлетворялись все требования по расходимости оптического пучка и погрешности измерений, определенные ГОСТ Р 59 607-2021.

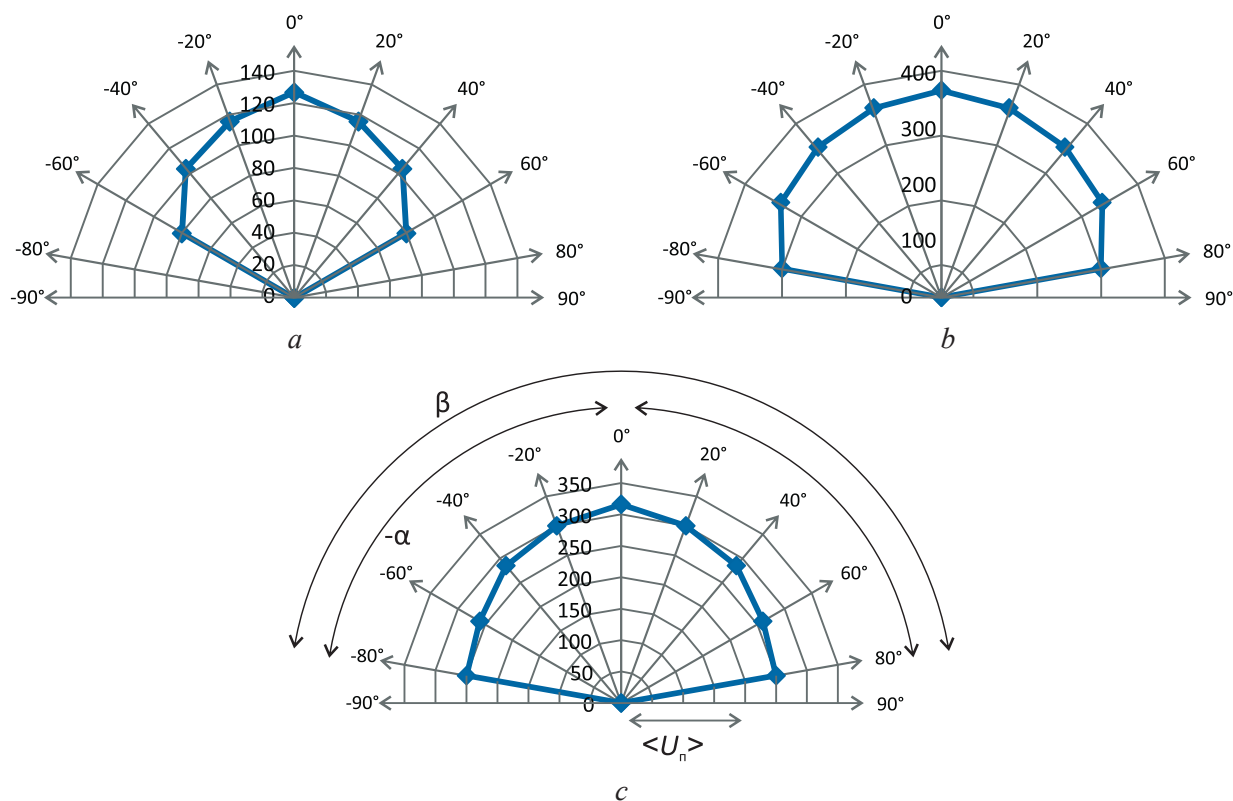


Рис. 2. Диаграммы изменения величины фотосигнала от углов  $\alpha$ : *a* – КОФ5-1035; *b* – Ketek PM 3325; *c* – ON Semi FC 30 035

Fig. 2. Diagrams of changes in the magnitude of the photosignal from the angles  $\alpha$ : *a* – KOF5-1035; *b* – Ketek PM 3325; *c* – ON Semi FC 30 035

**Результаты измерения и их обсуждение.** По результатам измерений были построены диаграммы в полярной системе координат, где вдоль полярной оси отложено значение фотосигнала  $\langle U_n \rangle$  в мВ (рис. 2). Измерения проведены при  $\Delta U = 0$  В и энергетической экспозиции  $H = 1 \cdot 10^{-9}$ ;  $1,7 \cdot 10^{-9}$ ;  $3 \cdot 10^{-9}$  Дж/м<sup>2</sup> для Ketek PM 3325, ON Semi FC 30 035 и КОФ5-1035 соответственно. При напряжениях питания, равных напряжению пробоя или  $\Delta U = 0$  В, отношение сигнал/шум исследуемых фотоприемников принимает максимальное значение [10]. Выбранные величины энергетической экспозиции соответствуют верхним границам динамического диапазона для всех исследуемых фотоприемников [11].

Как видно из рис. 2, максимальное значение напряжения фотосигнала  $U_{\max}$  соответствует углу  $\alpha = 0^\circ$ . Отметим, что полученные значения были симметричны относительно оси, проведенной под углом  $\alpha = 0^\circ$ , причем при смене расположения фотоприемника путем его поворота на  $180^\circ$  в горизонтальной плоскости наблюдается повторяемость результатов. С ростом отклонения угла падения оптического излучения от  $\alpha = 0^\circ$  происходит уменьшение величины напряжения фотосигнала.

При значениях углов в интервале  $\alpha = \pm 60^\circ$  величина напряжения фотосигнала фотозлектронного умножителя КОФ5-1035 уменьшается до величины  $\langle U_n \rangle = 0,61U_{\max}$ . Для углов  $\alpha$ , находящихся в интервалах от  $60^\circ$  до  $90^\circ$  и от  $-60^\circ$  до  $-90^\circ$ , величина  $\langle U_n \rangle$  была приблизительно равной нулю (см. рис. 2, *a*).

При значениях, соответствующих интервалу углов  $\alpha = \pm 80^\circ$ , величина напряжения фотосигнала Si-ФЭУ Ketek PM 3325 уменьшается до величины  $\langle U_n \rangle = 0,80U_{\max}$ , а для ON Semi FC 30 035 – до величины  $\langle U_n \rangle = 0,82U_{\max}$ . Для углов  $\alpha$ , находящихся в интервалах от  $80^\circ$  до  $90^\circ$  и от  $-80^\circ$  до  $-90^\circ$ , величина  $\langle U_n \rangle$  была приблизительно равной нулю для обоих фотоприемников (см. рис. 2, *b, c*).

Такое отличие в углах  $\alpha$ , при которых Si-ФЭУ были чувствительны к поступающему на них оптическому излучению, связано с тем, что для изготовления Si-ФЭУ использовались материалы

с различными показателями преломления на границе воздух – фоточувствительная поверхность. Поэтому оптическое излучение, падающее на фоточувствительную поверхность под разными углами  $\alpha$ , имеет разные значения коэффициента френелевского отражения. Также величина этих углов зависит от конструкции корпуса Si-ФЭУ. Отметим, что конструкция корпусов Si-ФЭУ Ketek PM 3325 и ON Semi FC 30 035 являются схожими, поэтому эти фотоприемники имеют одинаковые углы, для которых Si-ФЭУ были чувствительны к поступающему на них оптическому излучению. Конструкция корпуса КОФ5-1035 значительно отличается от конструкции корпусов других исследуемых Si-ФЭУ. В связи с этим величина измеряемых углов для КОФ5-1035 была другой по сравнению с Ketek PM 3325 и ON Semi FC 30 035.

В результате исследований были определены значения плоского угла зрения  $\beta$  исследуемых Si-ФЭУ для различных перенапряжений и при значениях энергетической экспозиции, соответствующих динамическому диапазону фотоприемников. Получена зависимость  $\beta(\Delta U)$ , которая показана на рис. 3. Рост перенапряжения приводил к увеличению угла  $\beta$ . При  $\Delta U = -0,5$  В, наименьшем значении из исследуемого интервала перенапряжений, величина фотосигнала принимала следующие значения:  $\langle U_{\text{п}} \rangle = 0,61U_{\text{max}}$  для КОФ5-1035 при  $\alpha = 40^\circ$  и  $\alpha = -40^\circ$ ;  $\langle U_{\text{п}} \rangle = 0,40U_{\text{max}}$  для Ketek PM 3325 при  $\alpha = 60^\circ$  и  $\alpha = -60^\circ$ ;  $\langle U_{\text{п}} \rangle = 0,46U_{\text{max}}$  для ON Semi FC 30 035 при  $\alpha = 60^\circ$  и  $\alpha = -60^\circ$ . При этом значение плоского угла зрения составляет  $\beta = 80^\circ, 120^\circ$  и  $120^\circ$  для КОФ5-1035, Ketek PM 3325 и ON Semi FC 30 035 соответственно.

При наибольшем значении  $\Delta U = 1,0$  В из исследуемого интервала перенапряжений величина фотосигнала составляла:  $\langle U_{\text{п}} \rangle = 0,64U_{\text{max}}$  для КОФ5-1035 при  $\alpha = 65^\circ$  и  $\alpha = -65^\circ$ ;  $\langle U_{\text{п}} \rangle = 0,90U_{\text{max}}$  для Ketek PM 3325 при  $\alpha = 85^\circ$  и  $\alpha = -85^\circ$ ;  $\langle U_{\text{п}} \rangle = 0,97U_{\text{max}}$  для ON Semi FC 30 035 при  $\alpha = 85^\circ$  и  $\alpha = -85^\circ$ . При этом значение плоского угла зрения составляет  $\beta = 130^\circ, 170^\circ$  и  $170^\circ$  для КОФ5-1035, Ketek PM 3325 и ON Semi FC 30 035 соответственно.

В диапазоне  $\Delta U = (-0,5 \div 0,0)$  В зависимость  $\beta$  от  $\Delta U$  аппроксимируется линейно возрастающей функцией, которая при  $\Delta U = 0$  В достигает значения, величина которого практически не изменяется при увеличении перенапряжения до  $\Delta U = 1,0$  В. Такое поведение зависимости  $\beta(\Delta U)$  наблюдается для всех исследуемых Si-ФЭУ. Для количественной оценки зависимостей  $\beta(\Delta U)$  в диапазоне  $\Delta U = (-0,5 \div 0,0)$  В можно воспользоваться величиной  $\Delta\beta/\Delta U_{\text{пп}}$ , где  $\Delta\beta$  – изменение плоского угла зрения при  $\Delta U_{\text{пп}}$  – изменении перенапряжения. Такая оценка показывает, что величина  $\Delta\beta/\Delta U_{\text{пп}}$  приблизительно одинакова для всех исследуемых Si-ФЭУ и составляет  $80^\circ/\text{В}$ .

Зависимость плоского угла зрения от перенапряжения обусловлена возрастанием чувствительности исследуемых фотоприемников при увеличении перенапряжения. Рост чувствительности приводит к тому, что для тех углов  $\alpha$ , при которых часть оптического излучения, не отраженная

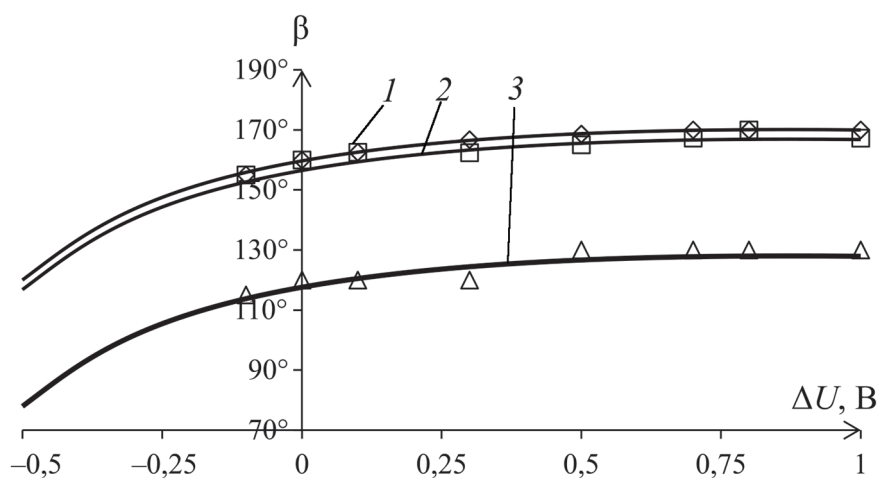


Рис. 3. Зависимость плоского угла зрения от величины перенапряжения: кривая 1 – Ketek PM 3325; кривая 2 – ON Semi FC 30 035; кривая 3 – КОФ5-1035

Fig. 3. Dependence of the flat angle of view on the magnitude of the overvoltage: curve 1 – Ketek PM 3325; curve 2 – ON Semi FC 30 035; curve 3 – KOF5-1035

от фоточувствительной поверхности, а поглощенная ей, не регистрировалась, при небольших перенапряжениях при повышении  $\Delta U$  начинает регистрироваться. Для перенапряжений в интервале  $\Delta U = (0,0 \div 1,0)$  В чувствительность исследуемых Si-ФЭУ изменялась незначительно. Поэтому для этих перенапряжений зависимость  $\beta$  от  $\Delta U$  также практически не изменялась.

Поскольку значения коэффициента френелевского отражения оптического излучения, падающего на фоточувствительную поверхность, не зависит от энергетической экспозиции излучения, то в пределах динамического диапазона исследуемых фотоприемников изменение ее не приводило к изменению величины плоского угла зрения.

Выполнены исследования зависимости отношения сигнал/шум ( $\rho$ ) от величины угла  $\alpha$  для разных значений перенапряжений и при одинаковых значениях энергетической экспозиции для всех исследуемых фотоприемников. Полученные зависимости были во многом аналогичны зависимостям напряжения фотосигнала  $\langle U_{\text{п}} \rangle$  от угла  $\alpha$ . Максимальное значение отношения сигнал/шум такой зависимости приходилось на значение  $\alpha = 0^\circ$ . Полученные значения отношения сигнал/шум были симметричны справа и слева относительно оси, проведенной под углом  $\alpha = 0^\circ$ , поэтому на рис. 4 представлены только зависимости отношения сигнал/шум от угла  $\alpha$ , находящегося в диапазоне от  $0^\circ$  до  $90^\circ$  для различных перенапряжений. Показаны зависимости для фотоэлектронных умножителей КОФ5-1035 как наиболее типичные. Для других исследуемых

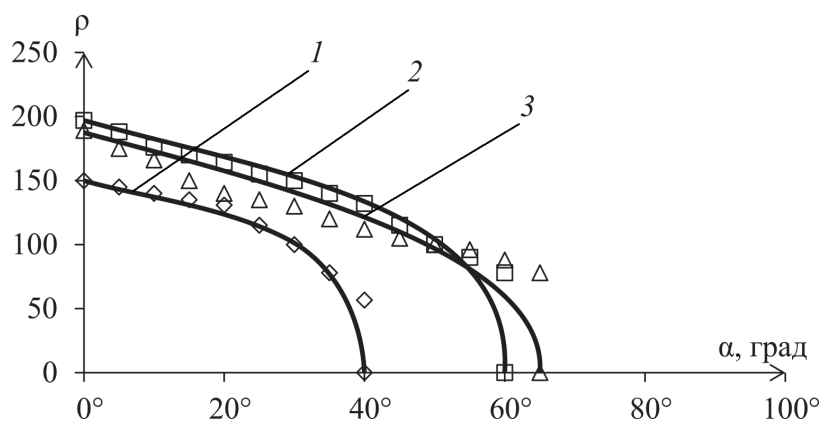


Рис. 4. Типичные зависимости отношения сигнал/шум от угла падения оптического излучения на фоточувствительную поверхность Si-ФЭУ: кривая 1 –  $\Delta U = -0,5$  В; кривая 2 –  $\Delta U = 0$  В; кривая 3 –  $\Delta U = 1,0$  В

Fig. 4. Typical dependences of the signal-to-noise ratio on the angle of incidence of optical radiation on the photosensitive surface of SiPM: curve 1 –  $\Delta U = -0.5$  V; curve 2 –  $\Delta U = 0$  V; curve 3 –  $\Delta U = 1.0$  V

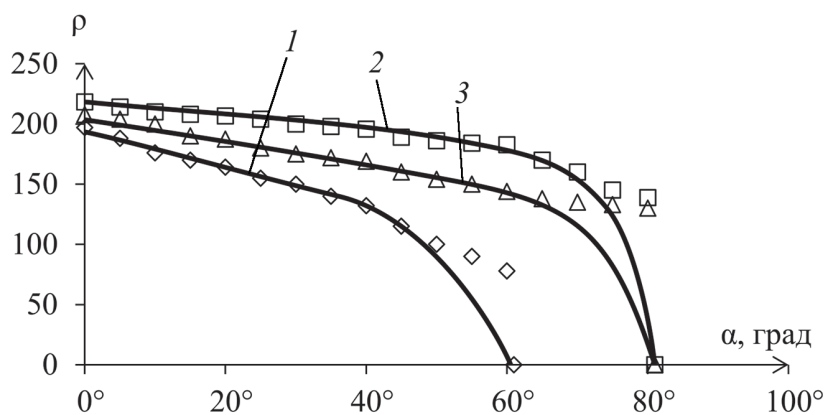


Рис. 5. Зависимость отношения сигнал/шум от угла падения оптического излучения на фоточувствительную поверхность Si-ФЭУ: кривая 1 – КОФ5-1035; кривая 2 – Ketek PM 3325; кривая 3 – ON Semi FC 30 035

Fig. 5. Dependence of the signal-to-noise ratio on the angle of incidence of optical radiation on the photosensitive surface of the SiPM: curve 1 – КОФ5-1035; curve 2 – Ketek PM 3325; curve 3 – ON Semi FC 30 035

Si-ФЭУ поведение этих зависимостей было аналогичным в пределах углов  $\alpha$ . Как видно из полученных зависимостей, с ростом отклонения угла падения оптического излучения от  $\alpha = 0^\circ$  происходит уменьшение величины отношения сигнал/шум, значение отношения сигнал/шум при этом остается больше единицы.

Наибольшее значение  $\rho$  в интервале углов от  $\alpha$  для всех фотоприемников наблюдается для  $\Delta U = 0$  В. Это связано с тем, что при  $\Delta U < 0$  В чувствительность исследуемых фотоприемников мала. При  $\Delta U > 0$  В значительно возрастает среднее квадратичное отклонение  $\sigma$  из-за роста темнового тока и флуктуаций коэффициента усиления фототока Si-ФЭУ. При этом напряжение  $\langle U_{\text{п}} \rangle$  практически не увеличивалось, поскольку чувствительность исследуемых кремниевых фотоэлектронных усилителей изменялась незначительно.

В связи с этим было выполнено сравнение зависимостей отношения сигнал/шум ( $\rho$ ) от угла  $\alpha$  при  $\Delta U = 0$  В и постоянной величине энергетической экспозиции. Полученные зависимости  $\rho(\alpha)$  представлены на рис. 5. Наибольшая величина отношения сигнал/шум для всех значений углов  $\alpha$  в пределах плоского угла зрения получена для Ketek PM 3325, а наименьшая – для КОФ5-1035. Для Ketek PM 3325 и ON Semi FC 30 035 при  $\alpha = (0^\circ - 80^\circ)$  и для КОФ5-1035 при  $\alpha = (0^\circ - 60^\circ)$  данная зависимость имеет характер близкий к линейному, а затем быстро уменьшается до нуля.

**Заключение.** Установлено, что плоский угол зрения кремниевых фотоумножителей зависит от напряжения питания и может изменяться от  $80^\circ$  до  $170^\circ$  при увеличении перенапряжения от  $-0,5$  до  $1,0$  В для фотоприемников разных производителей. Показано, что максимальное значение отношения сигнал/шум соответствует напряжению пробоя Si-ФЭУ. Установлено, что наибольшее значение отношения сигнал/шум в пределах плоского угла зрения имели фотоэлектронные умножители Ketek PM 3325. В пределах плоского угла зрения при напряжении пробоя отношение сигнал/шум исследуемых фотоприемников изменяется не менее, чем на 36 %.

Результаты исследований можно использовать при разработке и конструировании приборов и устройств для регистрации оптического излучения на основе кремниевых фотоумножителей.

### Список использованных источников

1. Макаренко, В. Технология Li-Fi как альтернатива Wi-Fi / В. Макаренко // Электрон. компоненты и системы. – 2020. – № 1. – С. 46–51.
2. Lifi: The Future Technology in Wireless Communication / V. Arya [et al.] // Int. J. Adv. Res. Electric., Electron. Instrument. Eng. – 2015. – Vol. 4, iss. 4. – P. 2340–2343.
3. Шассаж, Л. Сети Li-Fi: возможности и перспективы / Л. Шассаж // Соврем. светотехника. – 2018. – № 1. – С. 47–49
4. Silicon photomultiplier current and prospective applications in biological and radiological photonics / M. Staglianoa [et al.] // EPH – Int. J. Sci. Eng. – 2018. – Vol. 4, iss.10. – P. 10–29. <https://doi.org/10.53555/eijse.v4i4.143>
5. Кремниевый фотоэлектронный умножитель. Новые возможности / С. Клемин [и др.] // Электроника: наука, технология, бизнес. – 2007. – № 8. – С. 80–86.
6. Special Issue on: Optical Wireless Communications for Emerging Connectivity Requirements / M. Ali [et al.] // IEEE Open J. Commun. Soc. – 2021. – № 2. – P. 82–86. <https://doi.org/10.1109/OJCOMS.2020.3045818>
7. Гулаков, И. Р. Спектральные характеристики кремниевых фотоэлектронных умножителей / И. Р. Гулаков, А. О. Зеневич, О. В. Кочергина // Успехи приклад. физики. – 2021. – Т. 9, № 2. – С. 164–171. <https://doi.org/10.51368/2307-4469-2021-9-2-164-171>
8. Шубин, В. В. Информационная безопасность волоконно-оптических систем / В. В. Шубин; Всерос. науч.-исслед. ин-т эксперимент. физики. – М., 2015. – 258 с.
9. Гулаков, И. Р. Фотоприемники квантовых систем / И. Р. Гулаков, А. О. Зеневич. – Минск: УО ВГКС, 2012. – 276 с.
10. Работа кремниевых фотоэлектронных умножителей со структурой  $p^+p-n^+$  в режиме одноквантовой регистрации / М. А. Асаёнок [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2020. – Т. 65, № 3 – С. 349–356. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-3-349-356>
11. Зеневич, А. О. Исследование динамического диапазона кремниевых фотоэлектронных умножителей / А. О. Зеневич, О. В. Кочергина // Изв. высш. учеб. заведений. Электроника. – 2021. – Т. 26, № 1. – С. 30–39. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2021-26-1-30-39>

### References

1. Makarenko, V. *Li-Fi technology as an alternative to Wi-Fi. Elektronnyye komponenty i sistemy = Electronic Components and Systems*, 2020, no. 1, pp. 46–51 (in Russian).
2. Arya V., Priya P., Resma Omanakuttan, Shilby Baby. *Lifi: The Future Technology in Wireless Communication. International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, 2015, vol. 4, iss. 4, pp. 2340–2343.



3. Chassage L. LiFi networks: opportunities and prospects. *Sovremennaya svetotekhnika* [Modern Lighting Engineering], 2018, no. 1, pp. 47–49 (in Russian).
4. 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>
5. Klemin S., Kuznetsov Yu., Filatov L., Buzhan P., Dolgoshein B., Ilyin A., Popova E. Silicon photomultiplier. New opportunities. *Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes = Electronics: Science, Technology, Business*, 2007, no. 8, pp. 80–86 (in Russian).
6. Ali M., Khalighi A., Ghassemlooy Z., 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, no. 2, pp. 82–86. <https://doi.org/10.1109/OJCOMS.2020.3045818>
7. Gulakov I. R., Zenevich A. O., Kochergina O. V. Spectral characteristics of silicon photomultiplier. *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>
8. Shubin V. V. *Information Security of Fiber-Optic Systems*. Moscow, All-Russian Research Institute of Experimental Physics Publ., 2015. 258 p. (in Russian).
9. Gulakov I. R., Zenevich A. O. *Photodetectors of Quantum Systems*. Minsk, Higher State College of Communications Publ., 2012. 276 p. (in Russian).
10. Asayonak M. A., Zenevich A. O., Kacharhina V. V., Novikau Y. V., Saroka S. A. Operation of silicon photoelectronic multipliers with the structure  $p^+-p-n^+$  in the single quantum registration mode. *Vesti Natsyonal'nai akademii navuk Belarusi. Seriya fizika-technichnykh 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>
11. Zenevich A. O., Kochergina O. V. Investigation of Dynamic Range of Silicon Photoelectronic Multipliers. *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>