

УДК 621.383.92

PACS: 85.60.-q

## Реализация режима счета фотонов матричными многоэлементными лавинными фотоприемниками видимого и ближнего инфракрасного диапазонов

М. А. Асаёнок, А. О. Зеневич, Е. В. Новиков, О. В. Кочергина,  
А. А. Лагутик

*Подходы к реализации режима счета фотонов, используемые для одноэлементных лавинных фотоприемников, не в полной мере применимы к матричным многоэлементным лавинным фотоприемникам, таким как кремниевые фотоэлектронные умножители. Поэтому в статье рассмотрены особенности реализации режима счета фотонов применительно к этим фотоприемникам. Показана возможность работы в рассматриваемом режиме серийно выпускаемых кремниевых фотоэлектронных умножителей Кетек РМ 3325 и ON Semi FC 30035, а также умножителей из опытной партии, произведенной ОАО «Интеграл» (Республика Беларусь). Определены важные для реализации данного режима характеристики этих кремниевых фотоэлектронных умножителей, в частности, удельный коэффициент амплитудной чувствительности и зависимость отношения сигнал/шум от величины напряжения их питания.*

*Ключевые слова:* кремниевый фотоэлектронный умножитель, амплитудное распределение импульсов, счет фотонов, коэффициент амплитудной чувствительности, отношение сигнал/шум.

**Ссылка:** Асаёнок М. А., Зеневич А. О., Новиков Е. В., Кочергина О. В., Лагутик А. А. // Успехи прикладной физики. 2020. Т. 8. № 6. С. 464.

**Reference:** M. A. Asayonok, A. O. Zenevich, E. V. Novikov, O. V. Kocherhina, and A. A. Lahutsik, Usp. Prikl. Fiz. 8 (6), 464 (2020).

### Введение

В ряде публикаций [1–3] показано, что матричные многоэлементные лавинные фотоприемники, такие как кремниевые фотоэлектронные умножители (SiФЭУ)

могут быть использованы для реализации режима счета фотонов, однако особенности реализации режима применительно к ним не рассматривались. При этом следует отметить, что принципы счета фотонов применимые к одноэлементным лавинным

Асаёнок Марина Анатольевна, аспирант.  
Зеневич Андрей Олегович, ректор, профессор,  
д.т.н.

Новиков Евгений Владимирович, директор  
Института современных технологий связи, к.т.н.

Кочергина Ольга Викторовна, аспирант.  
Лагутик Анастасия Андреевна, аспирант.

Белорусская государственная академия связи.  
Беларусь, 220114, г. Минск, ул. Ф. Скорины, 8/2.  
E-mail: m.asayonok@bsac.by

Статья поступила в редакцию 29 октября 2020 г.

© Асаёнок М. А., Зеневич А. О., Новиков Е. В.,  
Кочергина О. В., Лагутик А. А., 2020

фотоприемникам, не могут быть в полной мере использованы для многоэлементных лавинных фотоприемников, в частности, для кремниевых фотоэлектронных умножителей.

Это связано с тем, что в одноэлементных лавинных фотоприемниках в режиме счета фотонов регистрируемый фотон формирует один электрический импульс на выходе фотоприемника. Такую регистрацию далее будем называть одноквантовой. В многоэлементных кремниевых фотоэлектронных умножителях реализовать одноквантовую регистрацию возможно, но только для таких интенсивностей оптического излучения, при которых вероятность регистрации фотонов одновременно двумя и более элементами достаточно мала [4]. Отметим, что под одновременной регистрацией понимается регистрация фотонов в пределах постоянной времени фотоприемника. Кроме этого, в SiФЭУ помимо импульсов, образованных регистрируемым оптическим излучением, возникают помеховые темновые импульсы, которые формируются в отдельных элементах термогенерированными носителями электрического заряда. Количество таких импульсов, возникающих в SiФЭУ за одну секунду при комнатной температуре, может превышать  $10^6$  [1, 5]. Реализация одноквантовой регистрации при таком большом числе темновых импульсов является нецелесообразной, т. к. не обеспечивается выигрыш по чувствительности в сравнении с другими способами регистрации [5]. В связи с этим для SiФЭУ необходим поиск достаточно высокочувствительного способа реализации режима счета фотонов.

Поэтому целью данной статьи является создание способа реализации режима счета фотонов для кремниевых фотоэлектронных умножителей и определение их характеристик важных для реализации этого способа.

## Методика и экспериментальная установка для выполнения исследований

Как показано в работах [1, 6, 7], амплитуда электрического импульса на выходе SiФЭУ зависит от того, в каком количестве элементов одновременно регистрируются фотоны оптического излучения. Чем больше амплитуда импульса, тем большее число фотонов зарегистрировано SiФЭУ одновременно. Измерив амплитуду этого импульса можно определить количество  $N_n$  одновременно сработавших элементов кремниевого фотоэлектронного умножителя в соответствии с отношением  $A_i/A_0$ , где  $A_i$  – амплитуда  $i$ -го импульса,  $A_0$  – амплитуда импульса, формирующегося при срабатывании только одного элемента SiФЭУ.

Для того, чтобы определить число фотонов  $N_\phi$ , поступивших на SiФЭУ, необходимо  $N_n$  разделить на квантовую эффективность регистрации фотоприемника  $\eta$ . Таким образом, число фотонов, регистрируемое за промежуток времени  $t$ , можно определить по следующей формуле:

$$N_\phi = \frac{\sum_{i=1}^m A_i}{\eta A_0}, \quad (1)$$

где  $m$  – число электрических импульсов SiФЭУ, образованных фотонами регистрируемого оптического излучения за промежуток времени  $t$ .

Для определения среднего числа фотонов  $\langle N_\phi \rangle$  можно использовать среднюю амплитуду электрических импульсов  $A_{cp}$ . Для этого необходимо воспользоваться следующим соотношением:

$$\langle N_\phi \rangle = \frac{mA_{cp}}{\eta A_0}. \quad (2)$$

Поскольку произведение, находящееся в знаменателе выражения (2), является величиной постоянной, то можно ввести коэффициент амплитудной чувствительно-

сти  $\beta = (\eta A_0)^{-1}$ . Тогда выражение (2) можно записать в следующем виде:

$$\langle N_\phi \rangle = m\beta A_{\text{ср}}. \quad (3)$$

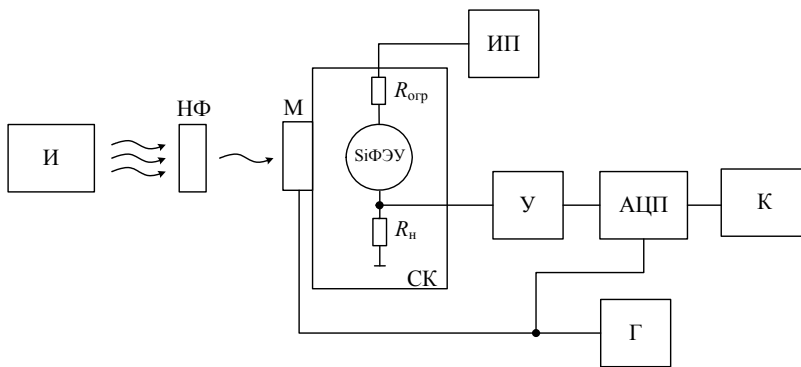
Среднюю амплитуду импульсов  $A_{\text{ср}}$  можно определить на основании амплитудного распределения импульсов SiФЭУ, регистрируемого при воздействии на него оптического излучения, как это было описано в работе [6].

Одной из важных для реализации режима счета фотонов характеристик фотоприемника является отношение сигнал/шум. В данном случае для определения отношения сигнал/шум можно воспользоваться следующей формулой:

$$C/\Pi = \frac{A_{\text{ср}}}{\sqrt{D}}, \quad (4)$$

где  $D$  – дисперсия амплитудного распределения импульсов. Дисперсия амплитудного распределения импульсов обусловлена наличием теплового и дробового шумов, а также разбросом амплитуды импульсов, вызванным статистическим распределением количества поступающих на фоточувствительную поверхность SiФЭУ фотонов.

С учетом приведенных замечаний для анализа возможностей способа реализации режима счета фотонов при помощи SiФЭУ предложена установка, структура которой приведена на рисунке 1.



**Рис. 1.** Установка, реализующая режим счета фотонов кремниевого фотозлектронного умножителя:

**И** – источник оптического излучения; **НФ** – набор нейтральных светофильтров; **М** – модулятор; **У** – усилитель; **ИП** – источник питания; **Г** – генератор прямоугольных импульсов; **АЦП** – аналого-цифровой преобразователь; **К** – компьютер; **СК** – светонепроницаемая кожуха;  $R_n$  – нагрузочный резистор;  $R_{огр}$  – ограничивающий резистор.

Установка функционирует следующим образом. От источника оптического излучения **И** через набор нейтральных светофильтров **НФ** и модулятор **М** на SiФЭУ подается оптическое излучение. SiФЭУ располагается в светонепроницаемой кожухе **СК** для ограничения его фоновой засветки. Набор нейтральных светофильтров **НФ** используется для ослабления интенсивности оптического излучения, поступающего на SiФЭУ. Коэффициент ослабления набора нейтральных светофильтров регулирует интенсивность в пределах от  $10^{-10}$  до  $10^{-5}$  Вт/см<sup>2</sup>. Модулятор **М** позволяет прерывать поток оптического излучения, поступающего на SiФЭУ.

Напряжение питания  $U_n$  на SiФЭУ подается от постоянного источника напряжения **ИП** через ограничивающий резистор  $R_{огр}$ . По величине это напряжение близко или превышает напряжение пробоя кремниевого фотозлектронного умножителя. Резистор  $R_{огр}$  используется для ограничения тока, протекающего через SiФЭУ. Последовательно с SiФЭУ включен резистор нагрузки  $R_n$ . На резисторе  $R_n$  формируются импульсы напряжения в случае, когда на SiФЭУ поступает оптическое излучение. Далее эти импульсы усиливаются при помощи усилителя **У** и поступают на аналого-цифровой преобразователь **АЦП**.

Длительность оптических импульсов засветки фотоприемника определяется генератором Г, управляющим модулятором, и составляет 1 мкс, что соответствует минимальной длительности электрического импульса, создаваемого SiФЭУ на резисторе нагрузки  $R_n$ .

Запуск АЦП также осуществляется генератором Г, что обеспечивает синхронизацию работы АЦП с работой модулятора М. Такая синхронизация позволяет аналого-цифровому преобразователю осуществлять оцифровку сигнальных импульсов напряжения только тогда, когда на SiФЭУ поступает оптическое излучение. Это практически исключает регистрацию темновых импульсов, формируемых SiФЭУ на резисторе нагрузки.

С выхода АЦП данные передаются в компьютер К. Специализированное программное обеспечение осуществляет обработку данных, а именно подсчитывает количество импульсов, поступивших за некоторый промежуток времени, строит амплитудное распределение импульсов, определяет среднюю амплитуду и дисперсию амплитудного распределения импульсов.

Приведенные выше соображения позволяют предложить для матричных многоэлементных лавинных фотоприемников следующий способ реализации режима счета фотонов. Оптическое излучение, поступающее на кремниевый фотоэлектронный умножитель, прерывают модулятором оптического излучения, формируя таким образом, импульсы напряжения на нагрузочном резисторе фотоприемника. Затем эти импульсы усиливают и оцифровывают аналого-цифровым преобразователем. Работу аналого-цифрового преобразователя синхронизируют с работой модулятора. Оцифрованные импульсы обрабатывают компьютером. При этом вычисляют количество импульсов, поступивших за время измерения, определяют среднюю амплитуду и дисперсию амплитудного распределения импульсов и рассчитывают по формуле (3) среднее количество фотонов, регистрируемых за время измерения.

В проведенных исследованиях способа реализации режима счета фотонов использовались кремниевые фотоэлектронные умножители из опытной партии, произведенной ОАО «Интеграл» (Республика Беларусь), а также серийно выпускаемые кремниевые фотоэлектронные умножители Кетек РМ 3325 и ON Semi FC 30035.

Исследования выполнялись при комнатной температуре 297 К. Длина волны оптического излучения составляла 650 нм, что соответствовало максимуму спектральной чувствительности исследуемых SiФЭУ.

Исследуемые SiФЭУ имели разные напряжения пробоя  $U_{пр}$ , а также различные площади фоточувствительной поверхности  $S_{п}$ . Поэтому при сопоставлении их характеристик применялись величины перенапряжения  $\Delta U$  и удельного коэффициента амплитудной чувствительности  $\beta_s$ , определяемые соответственно следующим образом:  $\Delta U = U_{п} - U_{пр}$ ,  $\beta_s = (\eta A_0 S_{п})^{-1}$ .

## Результаты измерения и их обсуждение

Для эффективного использования рассматриваемых фотоприемников в режиме счета фотонов необходимо иметь информацию о влиянии на параметры систем на базе этих SiФЭУ значений перенапряжения и интенсивности регистрируемого оптического излучения.

На рис. 2 представлены зависимости отношения сигнал/шум от приложенного перенапряжения для исследуемых SiФЭУ.

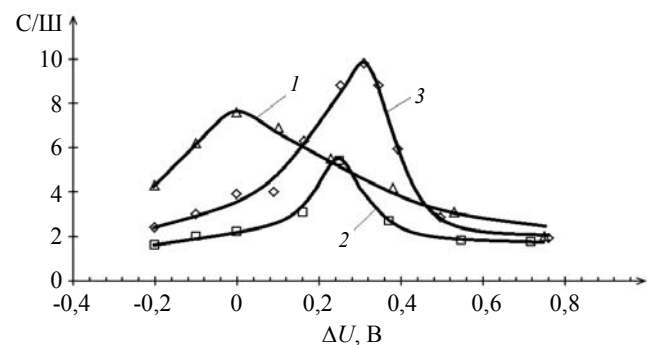


Рис. 2. Зависимость отношения сигнал/шум от перенапряжения: 1 – SiФЭУ ОАО «Интеграл»; 2 – ON Semi FC 30035; 3 – Кетек РМ 3325.

Перенапряжение следует выбирать таким, при котором отношение сигнал/шум имеет максимальное значение для каждой марки SiФЭУ. Так перенапряжения  $\Delta U$ , для которых это отношение было максимальным, соответствовали следующим значениям:  $\Delta U = 0,00$  В для SiФЭУ производства ОАО «Интеграл»;  $\Delta U = 0,31$  В для Кетек РМ 3325;  $\Delta U = 0,25$  В для ON Semi FC 30035.

Для способа реализации режима счета фотонов необходимо использовать интенсивности оптического излучения, для которых можно обеспечить энергетические экспозиции до  $3,1 \times 10^{-12}$  Дж/см<sup>2</sup> для SiФЭУ производства ОАО «Интеграл», до  $3,5 \times 10^{-12}$  Дж/см<sup>2</sup> для SiФЭУ марки Кетек РМ 3325 и до  $3,4 \times 10^{-12}$  Дж/см<sup>2</sup> для SiФЭУ марки ON Semi FC 30035 при длительности оптического импульса 1 мкс. Именно при таких значениях энергетической экспозиции удается получить амплитудные

распределения импульсов с ярко выраженными пиками (см. рис. 3, а, б) [7]. Это дает возможность осуществлять в дальнейшем селекцию событий срабатывания одного, двух и более элементов. При больших значениях энергетической экспозиции этого не удастся сделать в полной мере, поскольку изменяется вид амплитудного распределения импульсов и происходит наложение пиков, как это показано на рис. 3, в.

На рисунке 3 приведены результаты для SiФЭУ марки Кетек РМ 3325, так как эти результаты являются наиболее характерными для всех кремниевых фотоэлектронных умножителей, изученных в ходе рассматриваемых в данной статье исследований.

Далее исследования выполнялись для перенапряжений, при которых отношение сигнал/шум имело максимальное значение для соответствующей марки SiФЭУ.

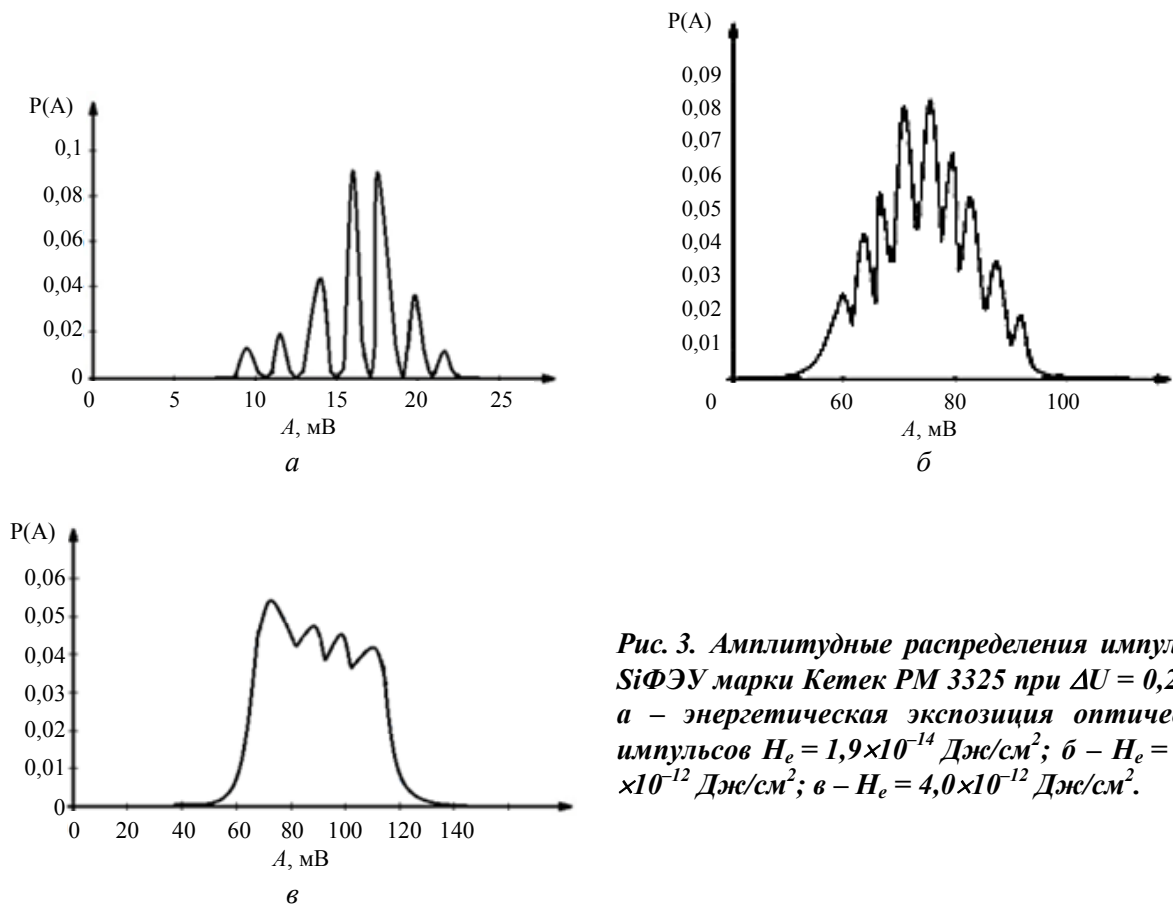


Рис. 3. Амплитудные распределения импульсов SiФЭУ марки Кетек РМ 3325 при  $\Delta U = 0,25$  В: а – энергетическая экспозиция оптических импульсов  $H_e = 1,9 \times 10^{-14}$  Дж/см<sup>2</sup>; б –  $H_e = 2,7 \times 10^{-12}$  Дж/см<sup>2</sup>; в –  $H_e = 4,0 \times 10^{-12}$  Дж/см<sup>2</sup>.

Отметим, что согласно формуле (3), для способа реализации режима счета фотонов необходимо наличие линейной зависимости между средним числом фотонов и средней амплитудой импульсов  $A_{cp}$ , а, следовательно, между энергетической экспозицией оптических импульсов  $H_e$  и  $A_{cp}$ .

На рисунке 4 показаны полученные зависимости  $A_{cp}$  от  $H_e$  для различных марок SiФЭУ.

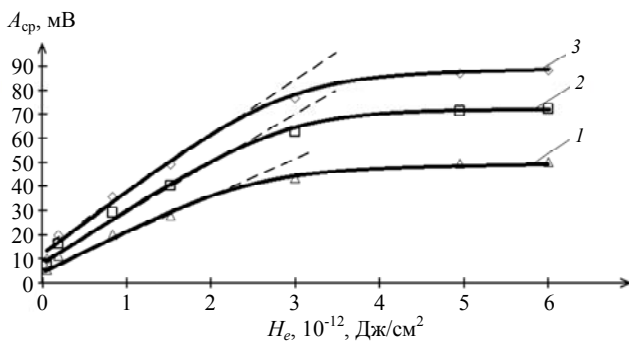


Рис. 4. Зависимости средней амплитуды от энергетической экспозиции: 1 – SiФЭУ ОАО «Интеграл»; 2 – ON Semi FC 30035; 3 – Кетек РМ 3325.

Как видно из этих зависимостей наименьший диапазон линейности имеют SiФЭУ ОАО «Интеграл».

Для линейного участка зависимости средней амплитуды от энергетической экспозиции определено максимальное и минимальное количество фотонов, которые может зарегистрировать система на

базе SiФЭУ за промежуток времени 1 мкс с учетом квантовой эффективности регистрации этого фотоприемника.

При этом поступление на фотоприемник минимального количества фотонов гарантирует, что системой будет зарегистрирован электрический сигнал, независимо от распределения фотонов в пределах указанного промежутка времени и от их распределения по площади фоточувствительной поверхности. Если количество поступивших на фотоприемник фотонов не превысит установленного максимального значения, то гарантируется линейность зависимости между средним числом фотонов и средней амплитудой регистрируемых электрических импульсов.

Так, минимальное количество фотонов для SiФЭУ марки Кетек РМ 3325 составляет 120, для SiФЭУ марки ON Semi FC 30035 – 100, а для SiФЭУ производства ОАО «Интеграл» – 20, а максимальное количество фотонов для SiФЭУ марки Кетек РМ 3325 имеет значение  $10^6$ , для SiФЭУ марки ON Semi FC 30035 –  $10^6$ , а для SiФЭУ производства ОАО «Интеграл» –  $2 \times 10^5$ .

Для сравнения чувствительности различных марок SiФЭУ между собой при реализации этого режима в таблице приведены значения удельных коэффициентов амплитудной чувствительности для напряжений, соответствующих максимуму отношения сигнал/шум (см. рис. 2).

Таблица

Характеристики кремниевых фотозлектронных умножителей для реализации способа режима счета фотонов

Тип SiФЭУ	Перенапряжение, В	Средняя амплитуда импульсов, мВ	Удельный коэффициент амплитудной чувствительности, $\text{мкВ}^{-1} \text{мм}^{-2}$
Кетек РМ 3325	0,31	88	1,3
ON Semi FC 30035	0,25	71	1,6
Производства ОАО «Интеграл»	0,00	47	2,2

Как следует из данных, представленных в таблице, наибольшее значение удельного коэффициента амплитудной чувствитель-

ности среди исследуемых имели SiФЭУ производства ОАО «Интеграл», а наименьшую – SiФЭУ марки Кетек РМ 3325. При

этом наибольшее значение средней амплитуды импульсов имеет SiФЭУ марки Кетек РМ 3325, а наименьшее – SiФЭУ производства ОАО «Интеграл».

### Заключение

Предложен способ реализации режима счета фотонов многоэлементными кремниевыми фотоэлектронными умножителями.

Определены характеристики различных типов кремниевых фотоэлектронных умножителей при реализации данного способа, такие как удельный коэффициент амплитудной чувствительности и зависимость отношения сигнал/шум от перенапряжения.

Показано, что на длине волны 650 нм больший удельный коэффициент амплитудной чувствительности имеет кремниевый фотоэлектронный умножитель производства ОАО «Интеграл».

Наименьшее количество фотонов, которое удалось зарегистрировать исследуемыми кремниевыми фотоэлектронными умножителями при использовании способа счета фотонов, при времени измерения 1 мкс равно 20.

Работа выполнена при поддержке  
Белорусского республиканского фонда  
фундаментальных исследований  
(договор № T20M-082).

### ЛИТЕРАТУРА

1. Клемин С., Кузнецов Ю., Филатов Л., Бужан П., Долгошеин Б., Ильин А., Попова Е. // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2007. № 8. С. 80.
2. Иванов И. // Фотоника. 2015. № 6 (54). С. 70.
3. Ming Chen, Chenghao Li, Alan P. Morrison, Shijie Deng, Chuanxin Teng, Houquan Liu, Hongchang Deng, Xianming Xiong, Libo Yuan // Electronics. 2020. Vol. 9. № 7. P. 1131. doi:10.3390/electronics9071131
4. Асаёнок М. А., Зеневич А. О., Новиков Е. В., Кочергина О. В. // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. 2020. Т. 65. № 3. С. 348. doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-3-349-356
5. Гулаков И. Р., Зеневич А. О. Фотоприемники квантовых систем: монография. – Минск: УО ВГКС, 2012.
6. Асаёнок М. А., Зеневич А. О., Новиков Е. В. // Прикладная физика. 2019. № 6. С. 96.
7. Асаёнок М. А., Зеневич А. О., Новиков Е. В., Сорока С. А. // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. 2020. Т. 65. № 1. С. 104. doi: 10.29235/1561-8358-2020-65-1-105-11.

PACS: 85.60.-q

## Implementation of the photon counting mode by array multielement avalanche photodetectors

*M. A. Asayonok, A. O. Zenevich, E. V. Novikov, O. V. Kocherhina,  
and A. A. Lahutsik*

Belarusian State Academy of Communications  
8/2 F. Skorina st., Minsk, 220114, Belarus

*Received October 29, 2020*

*The approaches to realizing the photon counting mode used for single-element avalanche photodetectors are not fully applicable to array multi-element avalanche photodetectors, such as silicon photo-electronic multipliers. Therefore, the article discusses the features of the implementation of the photon counting mode as applied to*

***these photodetectors. The possibility of operation in the considered mode of serially produced silicon photomultipliers Ketek RM 3325 and ON Semi FC 30035, as well as multipliers from a pilot batch manufactured by JSC "Integral" (Republic of Belarus) is shown. The characteristics of these silicon photomultipliers, which are important for the implementation of this mode, are determined, in particular, the specific amplitude sensitivity coefficient and the dependence of the signal-to-noise ratio on the value of their supply voltage.***

***Keywords:*** silicon photo-electronic multiplier, pulse-height distribution, photon counting, amplitude sensitivity factor, signal-to-noise ratio.

#### REFERENCES

1. S. Clemin, Y. Kuznetsov, L. Filatov, P. Buzhan, B. Dolgoshein, A. Ilyin, and E. Popova, *Electronics: Science, Technology, Business*, No. 8, 80 (2007).
2. I. Ivanov, *Photonics*, No. 6 (54), 70 (2015).
3. Ming Chen, Chenghao Li., Alan P. Morrison, Shijie Deng, Chuanxin Teng, Houquan Liu, Hongchang Deng, Xianming Xiong, and Libo Yuan. *Electronics*. **9** (7), 1131 (2020), doi: 10.3390/electronics 9071131
4. M. A. Asayonok, A. O. Zenevich, E. V. Novikov, and O. V. Kochergina, *Vestsi National Academy of Sciences of Belarus. Gray physics-technical science* **65** (3), 348 (2020), doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-3-349-356
5. I. R. Gulakov and A. O. Zenevich, *Photo-Receivers of Quantum Systems* (Minsk, UO VGKS, 2012) [in Russian].
6. M. A. Asayonok, A. O. Zenevich, and E. V. Novikov, *Applied Physics*, No. 6, 96 (2019) [in Russian].
7. M. A. Asayonok, A. O. Zenevich, E. V. Novikov, and S. A. Soroka, *Vestsi National Academy of Sciences of Belarus. Gray physics-technical science* **65** (1), 104 (2020), doi: 10.29235 / 1561-8358-2020-65-1-105-11.