

М. А. Асаёнок¹, А. О. Зеневи́ч¹, Е. В. Новиков¹, С. А. Сорока²

¹Белорусская государственная академия связи, Минск, Республика Беларусь,

²ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника», Минск, Республика Беларусь

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА АМПЛИТУДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КРЕМНИЕВЫХ ФОТОЭЛЕКТРОННЫХ УМНОЖИТЕЛЕЙ

Аннотация. Определены зависимости вида амплитудного распределения импульсов, созданных фототоком кремневых фотоэлектронных умножителей, от интенсивности регистрируемого оптического излучения. В качестве объектов исследования использовались серийно выпускаемые кремневые фотоэлектронные умножители Кетек РМ 3325 и ON Semi FC 30035, а также умножители из опытной партии, произведенной ОАО «ИНТЕГРАЛ» (Республика Беларусь). Выполнены исследования амплитудного распределения импульсов напряжения, сформированных на нагрузочном резисторе кремневых фотоэлектронных умножителей фототоком, для различных значений энергетической экспозиции оптических импульсов. Определен диапазон значений энергетической экспозиции оптических импульсов, в котором амплитудные распределения выходных импульсов фотоумножителей имеют ярко выраженные пики. Установлено, что с увеличением энергетической экспозиции оптического импульса часть пиков исчезает, а все зависимости средней амплитуды таких импульсов от величины энергетической экспозиции оптического импульса для кремневых фотоэлектронных умножителей имеют линейный участок. Показано, что увеличение энергетической экспозиции оптических импульсов приводит к росту дисперсии амплитудного распределения выходных импульсов фотоумножителей. Получено, что для линейной зависимости энергетической экспозиции оптического импульса от длительности оптического импульса в диапазоне от 50 нс до 1 мкс исследуемые кремневые фотоэлектронные умножители формировали импульсы напряжения длительностью 1 мкс с одинаковыми фронтами нарастания и спада. При этом средняя амплитуда этих импульсов имела линейную зависимость от длительности оптического импульса. Полученные результаты могут найти применение при проектировании фотоприемных устройств контроля уровня ионизирующего излучения для атомных электростанций, для квантовых информационных систем и в оптической связи при передаче информации с контролем наличия каналов утечки информации.

Ключевые слова: амплитудное распределение, кремневый фотоэлектронный умножитель, интенсивность регистрируемого оптического излучения, длительность оптических импульсов

Для цитирования: Влияние параметров оптического излучения на амплитудные характеристики кремневых фотоэлектронных умножителей / М. А. Асаёнок [и др.] // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2020. – Т. 65, № 1. – С. 104–109. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-1-104-109>

Maryna A. Asayonak¹, Andrey O. Zenevich¹, Yauhen V. Novikau¹, Syargey A. Saroka²

¹Belarusian State Academy of Communications, Minsk, Republic of Belarus

²State Scientific and Practical Association «Optics, Optoelectronics and Laser Technology», Minsk, Republic of Belarus

INFLUENCE OF OPTICAL RADIATION PARAMETERS ON THE AMPLITUDE CHARACTERISTICS OF SILICON PHOTOELECTRON MULTIPLIERS

Abstract. At present, silicon photoelectronic multipliers with a low voltage, high sensitivity in the visible and near infrared spectral regions, and large amplification factors are often used to record optical radiation in a wide range of intensities of the visible and near infrared spectral regions. The purpose of this article is to determine the dependence of the type of amplitude distribution of pulses, created by silicon photoelectronic multipliers, on the intensity of the recorded optical radiation. As research objects, commercially available Ketek PM 3325 and ON Semi FC 30035 silicon photomultiplier tubes have been used, as well as multipliers from a pilot batch manufactured by OJSC “INTEGRAL” (Republic of Belarus). The paper studies the amplitude distribution of voltage pulses, formed on the load resistor of silicon photoelectronic multipliers by the photocurrent for various values of the energy exposure of optical pulses. The range of values of the energy exposure of optical pulses was determined at which the amplitude distributions of these pulses have pronounced peaks. It was found out that with increasing energy exposure of the optical pulse, part of the peaks disappears. It was established that all the dependencies of the average amplitude of such pulses on the magnitude of the energy exposure of the optical pulse for silicon photomultiplier tubes have a linear section. The performed experimental studies showed that an increase in the energy exposure of optical pulses results in an increase in the dispersion of the amplitude distribution of pulses. It was found that for a linear dependence of the energy exposure of the optical pulse on the optical pulse duration in the range from 50 ns to 1 μs, the studied silicon photoelectronic

multipliers formed voltage pulses of 1 μ s duration with the same rising and falling edges. In this case, the average amplitude of these pulses had a linear dependence on the duration of the optical pulse. The results can be used in design of photodetector devices for monitoring the level of ionization radiation for nuclear power plants, for quantum information systems and in optical communications for transmitting information with monitoring the presence of information leakage channels.

Keywords: amplitude distribution, silicon photoelectron multiplier, intensity of detected optical radiation, duration of optical pulses

For citation: Asayonak M. A., Zenevich A. O., Novikau Ya. V., Saroca S. A. Influence of optical radiation parameters on the amplitude characteristics of silicon photoelectron multipliers. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2020, vol. 65, no. 1, pp. 104–109 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-1-104-109>

Введение. В настоящее время для регистрации оптического излучения в широком диапазоне интенсивности видимой и ближней инфракрасной области спектра часто используются кремниевые фотоэлектронные умножители [1, 2]. Эти фотоприемники имеют достаточно низкое напряжение питания, высокую чувствительность в видимой и ближней инфракрасной области спектра, большие коэффициенты усиления, превосходя по ряду параметров обычные фотоэлектронные умножители и лавинные фотодиоды.

Кремниевые фотоэлектронные умножители (Si-ФЭУ) являются многоэлементными детекторами, представляющими собой матрицу фотоприемников. Каждый элемент матрицы (пиксел) представляет из себя фотодиод. Все фотодиоды матрицы включены параллельно и работают на общую нагрузку [1].

Работа Si-ФЭУ основана на том, что в каждом p – n -переходе может быть создан токовой импульс, вызванный микроплазменным пробоем перехода. К появлению микроплазменного пробоя p – n -перехода может привести фото- или термогенерированный свободный носитель электрического заряда. При одновременном поглощении фотонов в разных p – n -переходах в каждом из них будет возникать сигнал в виде токового импульса. В результате выходной сигнал Si-ФЭУ представляет собой суммарный сигнал всех сработавших при поглощении фотонов p – n -переходов.

В существующих публикациях, посвященных исследованию принципов работы и характеристик этих фотоприемников, отсутствуют сведения о зависимости вида амплитудного распределения импульсов, созданных фототоком Si-ФЭУ, от интенсивности регистрируемого оптического излучения [3–6]. В связи с этим определение таких зависимостей и стало *целью данной работы*.

Описание установки и методики эксперимента. Для проведения исследований авторами данной статьи была создана экспериментальная установка, структура которой представлена на рис. 1.

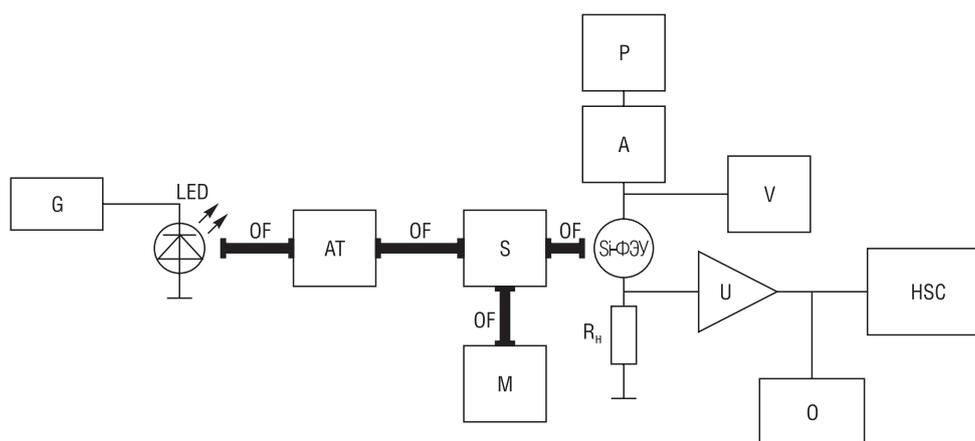


Рис. 1. Структурная схема экспериментальной установки: G – генератор, LED – светодиод, OF – оптическое волокно, AT – аттенюатор, S – разветвитель, M – измеритель энергетической экспозиции оптических импульсов, A – амперметр, P – источник питания, V – вольтметр, U – широкополосный усилитель, O – осциллограф, HSC – аппаратно-программный комплекс

Fig. 1. Structural diagram of the experimental setup: G – generator, LED – light-emitting diode, OF – optical fiber, AT – attenuator, S – splitter, M – optical pulse energy meter, A – ammeter, P – source of power, V – voltmeter, U – broadband amplifier, O – oscillograph, HSC – hardware and software complex

Источником оптического излучения в экспериментальной установке являлся светодиод с длиной волны 630 нм. Формирование оптических импульсов светодиодом осуществлялось под управлением генератора. Для этого генератор подавал на светодиод электрические импульсы прямоугольной формы с постоянной амплитудой, длительность которых могла изменяться в пределах 0,05–10,0 мкс, а частота следования оставалась неизменной и составляла 10^4 Гц. Для подачи оптического излучения на Si-ФЭУ использовались отрезки оптического волокна. Через первый отрезок оптического волокна и аттенюатор оптические импульсы светодиода попадали на разветвитель, который разделял оптическое излучение таким образом, что 50 % этого излучения поступало на Si-ФЭУ, а 50 % – на измеритель энергетической экспозиции оптических импульсов. Аттенюатор использовался для ослабления энергетической экспозиции оптических импульсов.

От источника питания на Si-ФЭУ подавалось постоянное напряжение питания $U_{\text{п}}$. Для контроля напряжения питания Si-ФЭУ использовался вольтметр.

Под воздействием оптических импульсов в Si-ФЭУ формировались электрические импульсы фототока. Они вызывали или стимулировали изменение падения напряжения на нагрузочном резисторе $R_{\text{н}} = 1$ кОм и формирование на нем импульсов напряжения. Затем импульсы напряжения усиливались широкополосным усилителем с полосой пропускания до 1 ГГц и подавались на вход аппаратно-программного комплекса. Аппаратно-программный комплекс создан на основе компьютера с быстродействующим аналого-цифровым преобразователем. Этот комплекс выполняет регистрацию амплитудных распределений импульсов напряжения (АРИ), поступающих на его вход.

Величина электрического тока, протекающего через Si-ФЭУ, измерялась при помощи амперметра. Амплитуда, длительность и частота следования импульсов контролировались при помощи осциллографа, подключенного к выходу усилителя.

Исследования выполнялись при постоянной температуре окружающей среды 293 К. Поскольку исследуемые Si-ФЭУ имели различные напряжения пробоя $U_{\text{пр}}$, то для сравнения их амплитудных характеристик между собой использовалась величина перенапряжения, рассчитываемая следующим образом: $\Delta U = U_{\text{п}} - U_{\text{пр}}$.

Результаты эксперимента и их обсуждение. В качестве объектов исследования использовались серийно выпускаемые кремниевые фотоэлектронные умножители Кетек РМ 3325 и ON Semi FC 30035, а также умножители из опытной партии, произведенной ОАО «ИНТЕГРАЛ» (Республика Беларусь). Напряжения пробоя для исследуемых Si-ФЭУ составляли: $U_{\text{пр}} = 27,0$ В для Кетек РМ 3325; $U_{\text{пр}} = 24,7$ В для ON Semi FC 30035; $U_{\text{пр}} = 37,5$ В для Si-ФЭУ производства ОАО «ИНТЕГРАЛ».

Исследования выполнены для напряжений питания, при которых отношение сигнал/шум имело максимальное значение для каждого типа фотоумножителей и определялось по методике, описанной в [5].

Перенапряжения, для которых это отношение было максимальным, соответствовали следующим значениям: $\Delta U = 0,30$ В для Кетек РМ 3325; $\Delta U = 0,25$ В для ON Semi FC 30035; $\Delta U = 0$ В для Si-ФЭУ производства ОАО «ИНТЕГРАЛ».

Проведенные исследования позволили определить вид зависимости амплитудного распределения выходных импульсов фотоумножителей от величины энергетической экспозиции оптических импульсов. На рис. 2 приведены результаты для Si-ФЭУ марки Кетек РМ 3325, так как эти результаты являются характерными для всех кремниевых фотоэлектронных умножителей, изученных в ходе описываемого в данной статье эксперимента.

Наименьшее значение энергетической экспозиции, при которой в исследуемых Si-ФЭУ формировались электрические импульсы, для умножителей было приблизительно одинаковым и составляло $H = 1,14 \cdot 10^{-8}$ Дж/см².

Как видно из полученных результатов, увеличение энергетической экспозиции оптических импульсов в диапазоне от $1,14 \cdot 10^{-8}$ до $2,67 \cdot 10^{-8}$ Дж/см² приводит к появлению ярко выраженных максимумов АРИ (см. рис. 2, а). Дальнейшее возрастание величины H обуславливает изменение вида АРИ и увеличение количества максимумов, как это показано на рис. 2, б. При дальнейшем росте энергетической экспозиции оптических импульсов наблюдалось исчезновение части максимумов (рис. 2, в). Такое поведение амплитудных распределений импульсов Si-ФЭУ, по всей видимости, связано с увеличением числа одновременно сработавших пикселей, а также проявлением межпиксельных оптических взаимодействий и ростом дисперсии коэффициента усиления одного

пиксела при повышении энергетической экспозиции оптического импульса.

Полученные нами зависимости средней амплитуды импульсов A_{cp} от H представлены на рис. 3. Все зависимости имели линейный участок, на котором A_{cp} увеличивается прямо пропорционально росту H . Такой диапазон линейности для всех исследуемых Si-ФЭУ соответствовал $H = (1,14-2,40) \cdot 10^{-8}$ Дж/см². Отметим, что при $H < 1,14 \cdot 10^{-8}$ Дж/см² оптические импульсы Si-ФЭУ не приводили к появлению импульса-отклика.

Дальнейшее увеличение энергетической экспозиции оптического импульса обуславливает отклонение зависимостей A_{cp} от H от линейной. При значениях $H \geq 4,50 \cdot 10^{-8}$ Дж/см² для Si-ФЭУ производства ОАО «ИНТЕГРАЛ» средняя амплитуда импульсов A_{cp} прекращала рост. Для других марок исследуемых Si-ФЭУ в диапазоне $H = (2,4-6,0) \cdot 10^{-8}$ Дж/см² наблюдался небольшой рост величины A_{cp} . Такое поведение зависимостей A_{cp} от H при $H > 2,6 \cdot 10^{-8}$ Дж/см² связано с тем, что при этих значениях энергетической экспозиции оптических импульсов наблюдается уменьшение коэффициента усиления фототока. Данный эффект наблюдался нами при исследовании коэффициента усиления фототока Si-ФЭУ [7]. Появление эффекта связано с ростом числа фотогенерированных свободных носителей заряда с увеличением H . При определенных значениях энергетической экспозиции оптических импульсов фотогенерированные свободные носители заряда приводят к значительному уменьшению напряженности электрического поля в областях умножения электрического заряда Si-ФЭУ. Это влечет уменьшение коэффициента умножения фототока.

Значения средней амплитуды импульсов при $H = (1,14-2,40) \cdot 10^{-8}$ Дж/см² были приблизительно одинаковыми для всех исследуемых Si-ФЭУ. В диапазоне $H = (2,4-6,0) \cdot 10^{-8}$ Дж/см² наибольшую амплитуду имели Si-ФЭУ Кетек РМ 3325, а наименьшую – Si-ФЭУ производства ОАО «ИНТЕГРАЛ».

Увеличение энергетической экспозиции оптического импульса приводило к увеличению дисперсии амплитудного распределения импульсов D , о чем свидетельствуют полученные нами зависимости D от H , представленные на рис. 4.

Отметим, что для Si-ФЭУ Кетек РМ 3325 значение D имело наибольшее значение во всем исследуемом диапазоне величин H по сравнению с другими марками Si-ФЭУ. Также для данных умножителей наблюдалась линейная зависимость дисперсии амплитудного распределения импульсов от энергетической экспозиции оптического импульса. Для других марок Si-ФЭУ такая зависимость D от H не установлена (см. рис. 4). При значениях энергетической экспозиции оптического импульса $H = (1,14-2,40) \cdot 10^{-8}$ Дж/см² дисперсия амплитудного распределения Si-ФЭУ производства ОАО «ИНТЕГРАЛ» изменялась незначительно. Необходимо отметить, что данный диапазон соответствовал линейной зависимости A_{cp} от H .

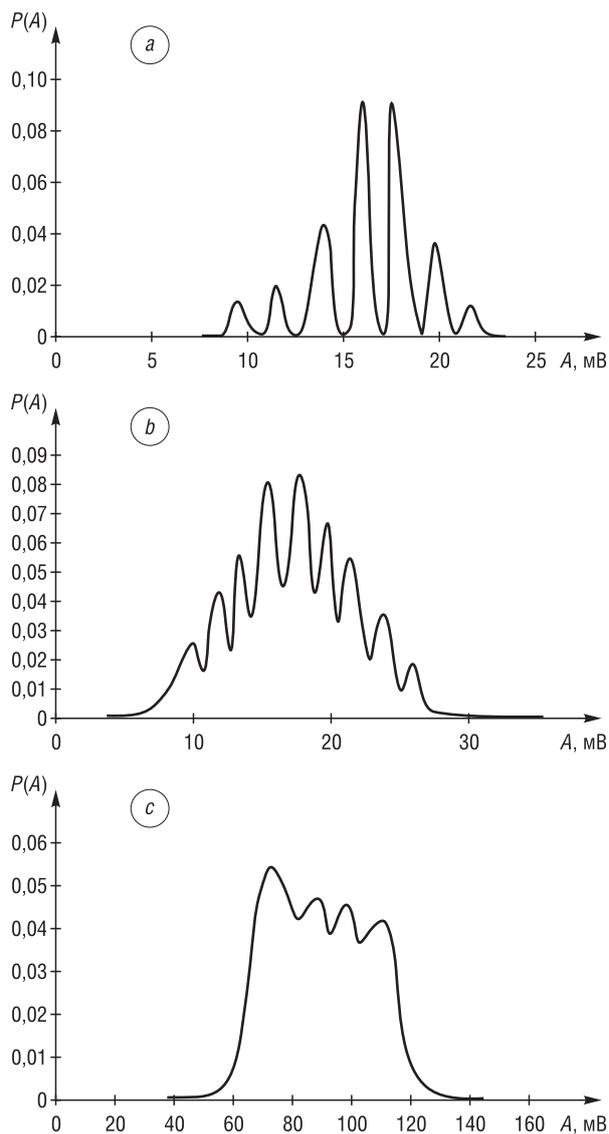


Рис. 2. Амплитудные распределения импульсов Si-ФЭУ: a – энергетическая экспозиция оптических импульсов $H = 1,91 \cdot 10^{-8}$ Дж/см², b – $H = 2,67 \cdot 10^{-8}$ Дж/см², c – $H = 3,96 \cdot 10^{-8}$ Дж/см²

Fig. 2. Amplitude distributions of Si-PMT pulses: a – energy exposure of optical pulses $H = 1.91 \cdot 10^{-8}$ J/cm², b – $H = 2.67 \cdot 10^{-8}$ J/cm², c – $H = 3.96 \cdot 10^{-8}$ J/cm²

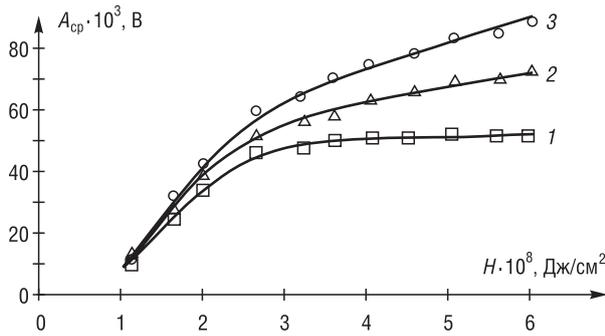


Рис. 3. Зависимость средней амплитуды от энергетической экспозиции при $\Delta U = 0,3$ В: 1 – Si-ФЭУ ОАО «ИНТЕГРАЛ», 2 – ON Semi FC 30035, 3 – Ketek PM 3325

Fig. 3. The dependence of the average amplitude on the energy exposure at $\Delta U = 0.3$ V: 1 – Si-PEM OJSC “INTEGRAL”, 2 – ON Semi FC 30035, 3 – Ketek PM 3325

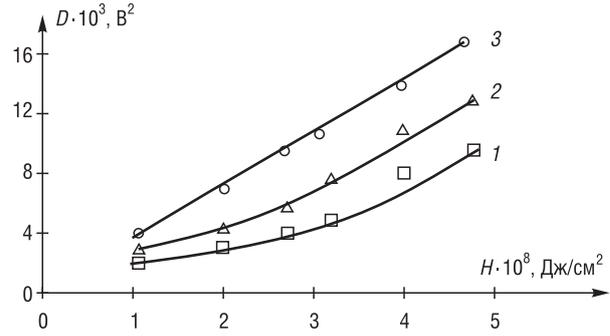


Рис. 4. Зависимость дисперсии от энергетической экспозиции при перенапряжении $\Delta U = 0,3$ В: 1 – Si-ФЭУ ОАО «ИНТЕГРАЛ», 2 – ON Semi FC 30035, 3 – Ketek PM 3325

Fig. 4. Dependence of dispersion on energy exposure during overvoltage $\Delta U = 0.3$ V: 1 – Si-PEM OJSC “INTEGRAL”, 2 – ON Semi FC 30035, 3 – Ketek PM 3325

В процессе выполнения исследований было установлено, что в случае линейной зависимости энергетической экспозиции оптического импульса от длительности оптического импульса τ в диапазоне от 0,05 до 1,00 мкс исследуемые Si-ФЭУ формировали на нагрузочном резисторе R_n импульсы напряжения длительностью 1,00 мкс с одинаковыми фронтом нарастания 0,10 мкс и фронтом спада 0,50 мкс. При этом средняя амплитуда этих импульсов имела линейную зависимость от величины τ . Для $\tau > 1,00$ мкс длительность электрических импульсов начинает соответствовать длительности оптических импульсов, а их амплитуда не изменяется.

Для оценки зависимости A_{cp} от τ использовалась величина $\Delta A_{cp}/\Delta\tau$, где ΔA_{cp} – изменение средней амплитуды импульсов Si-ФЭУ в диапазоне $\tau = 0,05$ –1,00 мкс, $\Delta\tau$ – изменение длительности оптического импульса в этом же диапазоне. Так, для интенсивности оптического излучения $I = 1,9 \cdot 10^{-2}$ Вт/см² значения были следующими: $\Delta A_{cp}/\Delta\tau = 3 \cdot 10^5$ В/с для Si-ФЭУ производства ОАО «ИНТЕГРАЛ»; $\Delta A_{cp}/\Delta\tau = 1 \cdot 10^5$ В/с для ON Semi FC 30 035; $\Delta A_{cp}/\Delta\tau = 2 \cdot 10^5$ В/с для Ketek PM 3325. Отметим, что энергетическая экспозиция оптических импульсов определялась по формуле $H = I \cdot \tau$. Наиболее сильная зависимость A_{cp} от τ наблюдалась для Si-ФЭУ производства ОАО «ИНТЕГРАЛ», а наименьшая – для ON Semi FC 30 035.

Заключение. Показано, что при значениях энергетической экспозиции оптического импульса в диапазоне от $1,14 \cdot 10^{-8}$ до $2,00 \cdot 10^{-8}$ Дж/см² амплитудные распределения импульсов напряжения, сформированных на нагрузочном резисторе кремниевых фотоэлектронных умножителей, имеют ярко выраженные пики. С увеличением энергетической экспозиции оптического импульса часть пиков исчезает.

Установлено, что в диапазоне энергетической экспозиции оптического импульса $H = (1,14$ – $2,60) \cdot 10^{-8}$ Дж/см² средняя амплитуда импульсов напряжения, сформированных на нагрузочном резисторе кремниевых фотоэлектронных умножителей, увеличивается прямо пропорционально росту энергетической экспозиции для всех исследуемых кремниевых фотоэлектронных умножителей.

Определено, что рост энергетической экспозиции оптического импульса приводит к увеличению дисперсии амплитудного распределения импульсов.

Получено, что в случае линейной зависимости энергетической экспозиции оптического импульса от длительности оптического импульса в диапазоне от 0,05 до 1,00 мкс исследуемые кремниевые фотоэлектронные умножители формировали на нагрузочном резисторе импульсы напряжения длительностью 1,00 мкс, при этом средняя амплитуда этих импульсов имела линейную зависимость от длительности оптического импульса τ .

Полученные результаты могут найти применение при проектировании фотоприемных устройств контроля уровня ионизирующего излучения для атомных электростанций, для квантовых информационных систем и в оптической связи при передаче информации с контролем наличия каналов утечки информации.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (договор № 18А3-014).

Acknowledgments

This work was supported by the Belarusian Republican Foundation for Basic Research (Agreement No. T18A3-014).

Список использованных источников

1. Гулаков, И. Р. Фотоприемники квантовых систем / И. Р. Гулаков, А. О. Зеневич. – Минск: УО ВГКС, 2012. – 276 с.
2. Development of a solid-state photomultiplier based on an array of Geiger mode CMOS avalanche photodiodes / W. G. Lawrence [et al.] // Proc. of SPIE. Semiconductor Photodetectors III / M. J. Cohen, E. L. Dereniak. – 2006. – Vol. 6119. – 10 p. <https://doi.org/10.1117/12.644917>
3. Твердотельный электронный умножитель многоцелевого назначения на основе гейгеровских микроячеек / Е. А. Георгиевская [и др.] // Приклад. физика. – 2003. – № 2. – С. 123–128.
4. Вероятностное распределение и шум-фактор сигналов твердотельных фотоэлектронных умножителей с учетом процессов кросс-толлка / С. Л. Виноградов [и др.] // Краткие сообщения по физике. – 2009. – № 9. – С. 3–13.
5. Асаёнок, М. А. Исследование характеристик кремниевых фотоэлектронных умножителей / М. А. Асаёнок, А. О. Зеневич // Приклад. физика. – 2018. – № 6. – С. 49–53.
6. Высокочувствительные микропиксельные лавинные фотодиоды для сцинтилляционных счетчиков нейтринного эксперимента Т2К / Ю. В. Мусиенко [и др.] // Приборы и техника эксперимента. – 2008. – № 1. – С. 111–118.
7. Асаёнок, М. А. Коэффициент усиления кремниевого фотоэлектронного умножителя с низким напряжением питания / М. А. Асаёнок, О. Ю. Горбадей, А. О. Зеневич // Проблемы инфокоммуникаций. – 2017. – № 2 (6). – С. 82–87.

References

1. Gulakov I. R., Zenevich A. O. *Photodetectors of Quantum Systems*. Minsk, UO VGKS, 2012, 276 p. (in Russian).
2. Lawrence W. G., Stapels C. J., Augustine F. L., Christian J. F. Development of a solid-state photomultiplier based on an array of Geiger mode CMOS avalanche photodiodes. *Proc. of SPIE. Semiconductor Photodetectors III*, 2006, vol. 6119. <https://doi.org/10.1117/12.644917>
3. Georgievskaya E. A., Klemin S. N., Filatov L. A., Buzhan P. Zh., Dolgoshein B. A., Ilyin A. L., Kantserov V. A., Kaplin V. A., Karakash A. I., Pleshko A. D., Popova E. V., Smirnov S. Yu. The solid-state silicon photomultiplier for a wide range of applications. *Prikladnaya fizika = Applied Physics*, 2003, no. 2, pp. 123–128 (in Russian).
4. Vinogradov S. L., Vinogradova T. R., Shubin V. E., Shushakov D. A. Probabilistic distribution and noise factor of solid state photomultiplier signals, taking into account cross-talk processes. *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*, 2009, vol. 36, no. 9, article number: 253. <https://doi.org/10.3103/S1068335609090012>
5. Asayonak M. A., Zenevich A. O. Investigation of the characteristics of silicon photomultipliers. *Prikladnaya fizika = Applied Physics*, 2018, no. 6, pp. 49–53 (in Russian).
6. Musienko Yu. V., Akhrameev E. V., Afanas'ev A. Yu., Bondarenko G. B., Golovin V. M., Gushchin E. N., Ershov N. V., Izmailov A. O., Kudenko Yu. G., Lubsandorzhiev B. K., Mayatskii V. A., Mineev O. V., Khabibullin M. M., Khotyantsev A. N., Shaibonov B. A. M., Shaikhiev A. T. Highly sensitive micropixel avalanche photodiodes for scintillation counters of the T2K neutrino experiment. *Instruments and Experimental Techniques*, 2008, vol. 51, no. 1, pp. 101–107. <https://doi.org/10.1134/S0020441208010119>
7. Asayonak M. A., Gorbadey O. Y., Zenevich A. O. Amplification Factor of Silicon Photoelectronic Multiplier with Low Voltage Supply. *Problemy Infokommunikacij*, 2017, no. 2, pp. 82–87 (in Russian).

Информация об авторах

Асаёнок Марина Анатольевна – аспирант, Белорусская государственная академия связи (ул. Ф. Скорины, 8/2, 220114, Минск, Республика Беларусь). E-mail: m.asayonok@bsac.by

Зеневич Андрей Олегович – доктор технических наук, профессор, ректор, Белорусская государственная академия связи (ул. Ф. Скорины, 8/2, 220114, Минск, Республика Беларусь). E-mail: a.zenevich@bsac.by

Новиков Евгений Владимирович – кандидат технических наук, доцент, директор, Институт современных технологий связи учреждения образования «Белорусская государственная академия связи» (ул. Ф. Скорины, 8/2, 220114, Минск, Республика Беларусь). E-mail: e.novikov@bsac.by

Сорока Сергей Александрович – ведущий инженер, ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» Национальной академии наук Беларуси (ул. Логойский тракт, 22, 220090, Минск, Республика Беларусь). E-mail: soroca@oelt.basnet.by

Information about the authors

Maryna A. Asayonak – Postgraduate Student, Belarusian State Academy of Communications (8/2, F. Skorina Str., 220114, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: m.asayonok@bsac.by

Andrey O. Zenevich – D. Sc. (Engineering), Professor, Rector, Belarusian State Academy of Communications (8/2, F. Skorina Str., 220114, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: a.zenevich@bsac.by

Yauhen V. Novikau – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Director, Institute of Modern Communication Technologies of the Belarusian State Academy of Communications (8/2, F. Skorina Str., 220114, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: e.novikov@bsac.by

Syargey A. Saroka – Leading Engineer, State Scientific-Production Association “Optics, Optoelectronics and Laser Technology” of the National Academy of Sciences of Belarus (22, Logoiskij tract, 220090, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: soroca@oelt.basnet.by