

Исследование амплитудных характеристик кремниевых фотоэлектронных умножителей*М. А. Асаёнок, А. О. Зеневич, Е. В. Новиков*

Для регистрации оптического излучения малой интенсивности в видимой и ближней инфракрасной областях спектра при комнатных температурах нашли применение кремниевые лавинные фотоприемники с высокой чувствительностью в этих областях спектра при низких напряжениях питания и большими коэффициентами усиления.

В статье установлены зависимости вида амплитудного распределения сигналов таких фотоприемников от величины напряжения их питания.

В качестве объектов исследования использованы серийно выпускаемые кремниевые фотоэлектронные умножители Кетек РМ 3325 и ON Semi FC 30035, а также умножители из опытной партии, произведенной ОАО «Интеграл» (Республика Беларусь).

Определен диапазон напряжений, при которых амплитудные распределения выходных сигналов кремниевых фотоэлектронных умножителей имеют ярко выраженные пики. Установлено, что с увеличением напряжения питания часть пиков исчезает.

Показано, что зависимости средней амплитуды отклика от перенапряжения для кремниевых фотоэлектронных умножителей имеют линейный участок, а увеличение перенапряжения приводит к росту дисперсии амплитудного распределения импульсов.

Ключевые слова: амплитудное распределение, кремниевый фотоэлектронный умножитель, дисперсия.

Ссылка: Асаёнок М. А., Зеневич А. О., Новиков Е. В. // Прикладная физика. 2019. № 6. С. 96.

Reference: M. A. Asayonak, A. O. Zenevich, and E. V. Novikov, Prikl. Fiz., No. 6, 96 (2019).

Введение

В настоящее время для регистрации оптического излучения малой интенсивности (менее 10^{-8} Вт/м²) в видимой и ближней инфракрасной области спектра при комнатных температурах находят применение кремниевые лавинные фотоприемники [1, 2]. Однако данные фотоприемники, применяемые для регистрации оптического излучения малой ин-

тенсивности, имеют малые коэффициенты усиления фототока (менее 10^3) и небольшие площади фоточувствительной поверхности (менее 0,3 мм²). Последнее ограничение связано с тем, что кремниевые лавинные фотоприемники с большой площадью фоточувствительной поверхности имеют при комнатных температурах высокий уровень термоэлектрических шумов.

В последние годы для регистрации оптического излучения все чаще применяются многоэлементные детекторы, построенные на основе структуры металл–резистивный слой–полупроводник. Такие фотоприемники называют также кремниевыми фотоэлектронными умножителями (Si-ФЭУ). Эти фотоприемники представляют собой упорядоченный набор *p-n*-переходов (пикселей), выполненных на общей подложке [3]. Принцип работы Si-ФЭУ заключается в том, что в каждом пикселе мо-

Асаёнок Марина Анатольевна, аспирант.
Зеневич Андрей Олегович, ректор, д.т.н., профессор.
Новиков Евгений Владимирович, директор Института современных технологий связи, к.т.н.
Белорусская государственная академия связи.
Беларусь, 220114, Минск, ул. Ф. Скорины, 8/2.
E-mail: m.asayonok@bsac.by, a.zenevich@bsac.by, e.novikov@bsac.by

Статья поступила в редакцию 18 октября 2019 г.

© Асаёнок М. А., Зеневич А. О., Новиков Е. В., 2019

жет быть сформирован токовой импульс, вызванный микроплазменным пробоем. К возникновению микроплазменного пробоя пикселя приводит фотогенерированный носитель электрического заряда, образованный падающим на фотоприемник фотоном оптического излучения. Также к возникновению такого пробоя может привести появление в пикселе термогенерированного носителя заряда. Все пиксели имеют токоограничивающий резистор. При одновременном поглощении фотонов в разных пикселях в каждом из них формируется выходной сигнал. В этом случае выходной сигнал Si-ФЭУ определяется суммарным сигналом всех сработавших при поглощении фотонов пикселей.

Преимуществами Si-ФЭУ по сравнению с кремниевыми лавинными фотоприёмниками является то, что они имеют большую площадь фоточувствительной поверхности и более высокий коэффициент усиления фототока ($M \geq 10^5$).

Однако, несмотря на имеющиеся публикации [4–6], связанные с изучением принципов работы и характеристик Si-ФЭУ, отсутствуют сведения о зависимости вида амплитудного распределения импульсных выходных сигналов Si-ФЭУ от величины напряжения его питания. Также не установлены зависимости средней амплитуды импульсов и дисперсии

амплитудного распределения импульсов от напряжения питания Si-ФЭУ. Определение указанных зависимостей и стало целью данной работы.

Описание установки и методики эксперимента

Исследования проводились на экспериментальной установке, структурная схема которой представлена на рис. 1.

В качестве источника оптического излучения использовался светодиод (СД) с длиной волны 630 нм, что соответствовало максимуму спектральной чувствительности исследуемых фотоприемников. Для формирования оптических импульсов на светодиод (СД) от генератора (Г) подавались электрические импульсы прямоугольной формы с постоянной амплитудой. Длительность этих импульсов составляла 1 мкс, а частота следования – 10^4 Гц. Частота, амплитуда и длительность электрических импульсов контролировались при помощи осциллографа (ОС1). Оптические импульсы от светодиода (СД) направлялись на Si-ФЭУ через набор нейтральных светофильтров (Н). Светофильтры использовались для ослабления энергетической экспозиции оптических импульсов.

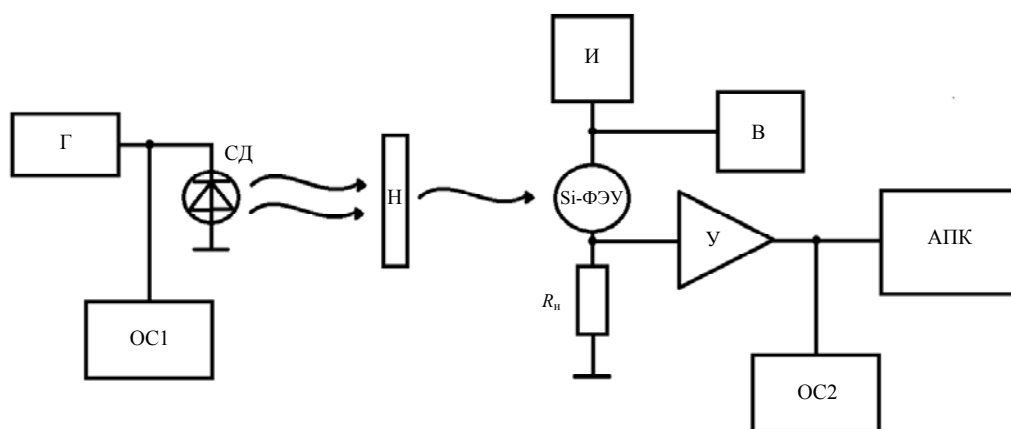


Рис. 1. Структурная схема экспериментальной установки: Г – генератор; СД – светодиод; Н – набор нейтральных светофильтров; И – источник стабилизированного напряжения; В – вольт-метр; У – широкополосный усилитель; R_n – резистор нагрузки; Si-ФЭУ – кремниевый фотозлектронный умножитель; АПК – аппаратно-программный комплекс; ОС1, ОС2 – осциллограф.

Напряжение питания U_n на Si-ФЭУ подавалось от источника стабилизированного напряжения (И) и контролировалось при помощи вольтметра (В). Под воздействием оптических импульсов в Si-ФЭУ формировались

электрические импульсы фототока. Эти импульсы приводили к изменению падения напряжения на нагрузочном резисторе R_n и возникновению на нем импульсов напряжения. Импульсы напряжения усиливались при

помощи широкополосного усилителя (У) с полосой пропускания до 1 ГГц и коэффициентом усиления 100.

Затем импульсы поступали на вход аппаратно-программного комплекса (АПК), который обеспечивал их оцифровку аналого-цифровым преобразователем и последующую обработку данных. Специализированное программное обеспечение аппаратно-программного комплекса позволяло накапливать амплитудные распределения импульсов напряжения и оценивать их параметры. Отметим, что амплитуда, длительность и частота импульсов на выходе усилителя контролировались при помощи осциллографа (ОС2).

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

Результаты эксперимента и их обсуждение

В качестве объектов исследования использовались серийно выпускаемые кремние-

вые фотоэлектронные умножители марки Кетек РМ 3325 и марки ON Semi FC 30035, а также умножители из опытной партии, произведенной ОАО «Интеграл» (Республика Беларусь). Напряжение пробоя для исследуемых Si-ФЭУ составляло: $U_{пр} = 27,0$ В для Кетек РМ 3325, $U_{пр} = 24,7$ В для ON Semi FC 30035 и $U_{пр} = 37,5$ В для Si-ФЭУ производства ОАО «Интеграл».

Выполненные исследования позволили установить вид зависимости амплитудного распределения импульсов Si-ФЭУ от величины перенапряжения. На рис. 2 представлены результаты для Si-ФЭУ марки Кетек РМ 3325, типичные для всех типов исследуемых кремниевых фотоэлектронных умножителей. Измерения выполнены при постоянном значении энергетической экспозиции оптических импульсов $H = 1,91 \times 10^{-8}$ Дж/см². Величина H выбиралась как минимальное значение, которое обеспечивает формирование сигналов при напряжениях, соответствующих $\Delta U = 0,0$ В. Отметим, что при изменении перенапряжения в диапазоне 0,0÷2,0 В чувствительность исследуемых Si-ФЭУ возрастала, а минимальной она была при $\Delta U = 0,0$ В.

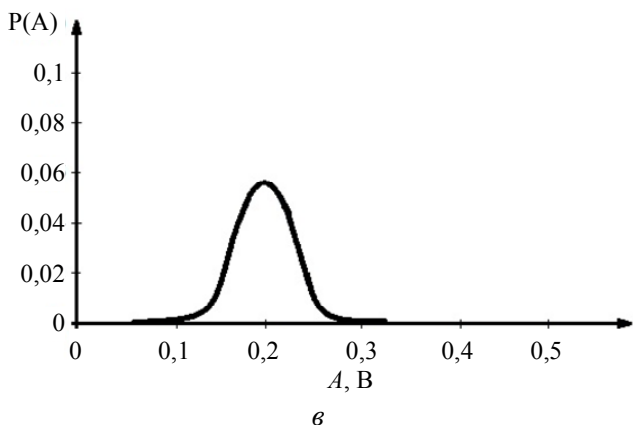
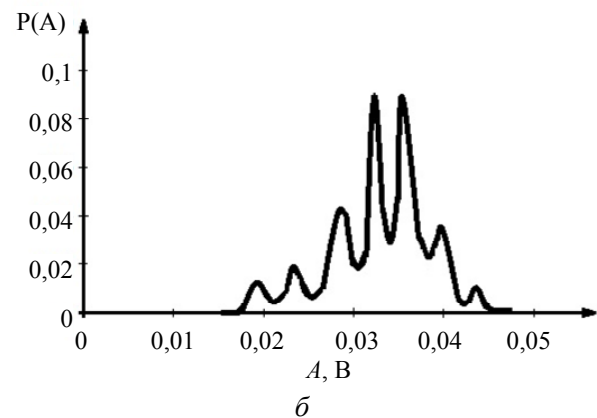
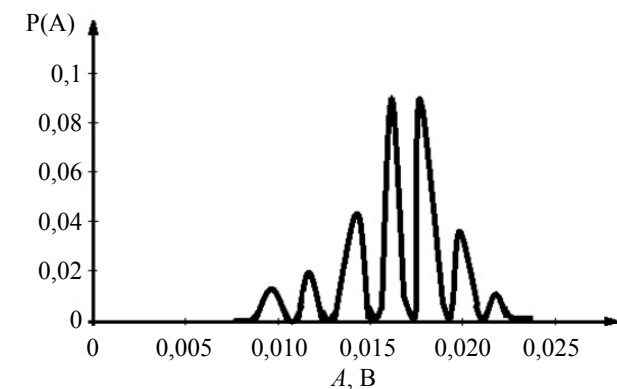


Рис. 2. Амплитудные распределения импульсов Si-ФЭУ при различных величинах перенапряжения: а – перенапряжение $\Delta U = 0,0$ В; б – $\Delta U = 0,7$ В; в – $\Delta U = 1,5$ В.

Как видно из полученных результатов, при ΔU в диапазоне от 0,0 до 0,7 В имеются ярко выраженные максимумы. Первый пик амплитудного распределения (см. рис. 2, а) соответствует срабатыванию одного пикселя Si-ФЭУ при регистрации фотона оптического импульса, второй пик – обусловлен одновременным срабатыванием двух пикселей при регистрации двух фотонов оптического импульса, третий пик – вызван одновременным срабатыванием трех пикселей при регистрации трех фотонов оптического импульса и так далее. Максимальное количество одновременно сработавших пикселей в нашем случае не превышало 7. Дальнейшее увеличение перенапряжения приводит к изменению вида амплитудного распределения и прослеживается тенденция исчезновения пиков (см. рис. 2, б). При значениях перенапряжения $\Delta U = 1,5$ В в амплитудном распределении пики исчезают (см. рис. 2, в).

Отметим, что не для всех Si-ФЭУ производства ОАО «Интеграл» в амплитудном распределении импульсов наблюдались четко выраженные пики. Исчезновение пиков или их отсутствие, по всей видимости, обусловлено проявлением межпиксельных оптических взаимодействий и достаточно большой дисперсией коэффициента усиления одного пикселя.

Увеличение перенапряжения приводит к росту средней амплитуды импульсов A_{cp} , как показано на рис. 3. Это связано с тем, что с ростом ΔU увеличивается коэффициент усиления фототока. Для диапазона перенапряжений $\Delta U = 0,0 \div 1,0$ В данные зависимости были практически линейными для всех исследуемых Si-ФЭУ. Также в этом диапазоне перенапряжений средняя амплитуда импульсов незначительно отличалась для исследуемых кремниевых фотозлектронных умножителей. При значениях $\Delta U > 1,0$ В наблюдается достаточно резкий рост амплитуды импульсов (см. рис. 3).

В диапазоне перенапряжений $\Delta U = 0,0 \div 1,0$ В величина отношения изменения средней амплитуды к изменению перенапряжения $\Delta A_{cp} / \Delta U_{п}$ для всех исследуемых Si-ФЭУ была примерно одинаковой и не превышала 0,05. Для диапазона $\Delta U = 1,0 \div 2,0$ В это отношение составляло следующие значения:

$\Delta A_{cp} / \Delta U_{п} = 0,27$ для Кетек РМ 3325; $\Delta A_{cp} / \Delta U_{п} = 0,42$ для ON Semi FC 30035 и $\Delta A_{cp} / \Delta U_{п} = 0,54$ для Si-ФЭУ производства ОАО «Интеграл». Таким образом, в этом диапазоне перенапряжений наиболее сильную зависимость амплитуды от перенапряжения имели Si-ФЭУ производства ОАО «Интеграл», а наименьшую – Si-ФЭУ марки Кетек РМ 3325.

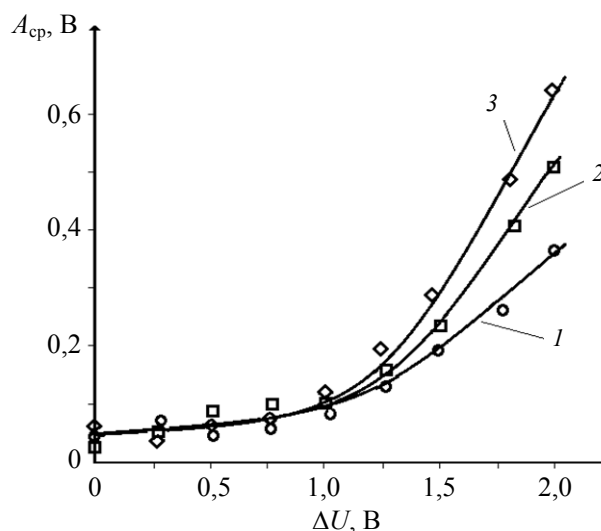


Рис. 3. Зависимость средней амплитуды импульсов A_{cp} от перенапряжения ΔU : 1 – Кетек РМ 3325; 2 – ON Semi FC 30035; 3 – Si-ФЭУ ОАО «Интеграл».

Эффект связан с тем, что данные фотоприемники при $\Delta U > 1,0$ В имели различные коэффициенты усиления фототока. Наибольший при этих перенапряжениях имели Si-ФЭУ производства ОАО «Интеграл», а наименьший – Si-ФЭУ марки Кетек РМ 3325.

Увеличение перенапряжения приводит к росту дисперсии амплитудного распределения D . Зависимости дисперсии амплитудного распределения от перенапряжения для исследуемых Si-ФЭУ представлены на рис. 4. Поведение зависимостей D от ΔU во многом повторяет поведение зависимостей средней амплитуды импульсов Si-ФЭУ от перенапряжения, представленных на рис. 3. Таким образом, можно утверждать, что с увеличением средней амплитуды импульсов, связанным с повышением перенапряжения, наблюдается рост дисперсии амплитудного распределения импульсов для всех исследуемых Si-ФЭУ. Отметим, что наиболее значительное увеличение дисперсии с ростом перенапряжения наблюдается при $\Delta U > 1,0$ В.

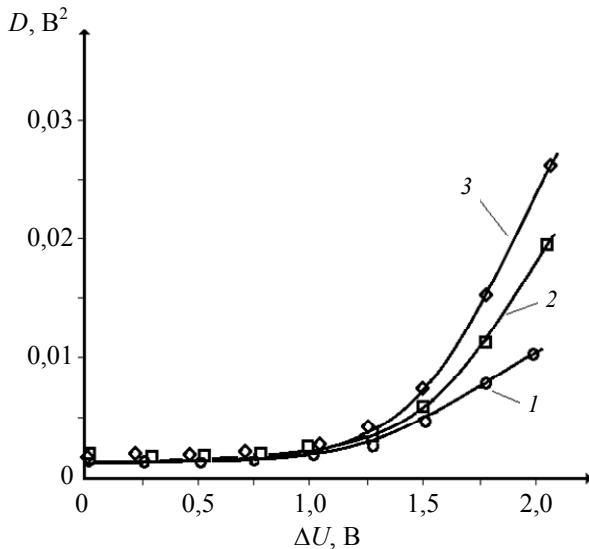


Рис. 4. Зависимость дисперсии D амплитудного распределения от перенапряжения: 1 – Si-ФЭУ марки Кетек РМ 3325; 2 – Si-ФЭУ марки ON Semi FC 30035; 3 – Si-ФЭУ ОАО «Интеграл».

Заключение

Представлены результаты исследования влияния напряжения питания на вид амплитудного распределения импульсных выходных сигналов кремниевых фотоэлектронных умножителей (Si-ФЭУ).

Показано, что при ΔU в диапазоне от 0,0 до 0,7 В амплитудные распределения импульсных выходных сигналов кремниевых фотоэлектронных умножителей имеют ярко выраженные пики. С увеличением перенапряжения данные пики исчезают.

Установлено, что рост перенапряжения приводит к увеличению средней амплитуды импульсов. При этом в диапазоне перенапряжения $\Delta U = 0,0 \div 1,0$ В зависимость средней амплитуды от перенапряжения имеет линейный вид. Для значений $\Delta U > 1,0$ В наблюдается достаточно резкий рост амплитуды импульсов.

Определено, что увеличение перенапряжения приводит к росту дисперсии амплитудного распределения импульсов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гулаков И. Р., Зеневич А. О. Фотоприемники квантовых систем: монография. – Минск: УО ВГКС, 2012.
2. Shimizu K., Fujise M., Nunokawa M. // Electron. Lett. 1987. Vol. 23. No. 24. P. 1307.
3. Георгиевская Е. А., Клемин С. Н., Филатов Л. А., Бужан П. Ж., Долгошеин Б. А., Ильин А. Л., Канцеров В. А., Каплин В. А., Каракаш А. И., Пleshко А. Д., Попова Е. В., Смирнов С. Ю. // Прикладная физика. 2003. № 2. С. 123.
4. Виноградов С. Л., Виноградова Т. Р., Шубин В. Э., Шушаков Д. А. // Краткие сообщения по физике. ФИАН. 2009. № 9. С. 3.
5. Асаёнок М. А., Зеневич А. О. // Прикладная физика. 2018. № 6. С. 49.
6. Мусиенко Ю. В., Ахrameев Е. В., Афанасьев А. Ю., Бондаренко Г. Б., Головин В. М., Гуцин Е. Н., Ершов Н. В., Измайлов А. О., Куденко Ю. Г., Лубсандоржиев Б. К., Маяцкий В. А., Минеев О. В., Хабибуллин М. М., Хотянцев А. Н., Шайбонов Б. А. М., Шайхиев А. Т. // Приборы и техника эксперимента. 2008. № 1. С. 111.

PACS: 85.60.-q

Study of the amplitude characteristics of silicon photo-electronic multipliers

M. A. Asayonak, A. O. Zenevich, and E. V. Novikov

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

E-mail: m.asayonok@bsac.by, a.zenevich@bsac.by, e.novikov@bsac.by

Received October 18, 2019

Silicon avalanche photodetectors with high sensitivity in these spectral regions at low supply voltages and high amplification factors have been used to record low-intensity optical radiation in the visible and near infrared regions of the spectrum at room temperatures.

The article establishes the dependence of the type of amplitude distribution of the signals of such photodetectors on the magnitude of their supply voltage.

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 range of values of the voltage of optical pulses was determined at which the amplitude distributions of these pulses have pronounced peaks.

It was found out that with increasing voltage of the optical pulse, part of the peaks disappears.

It was established that all the dependences of the average amplitude of response of the voltage of the optical pulse for silicon photomultiplier tubes have a linear section. The performed experimental studies showed that an increase in the voltage of optical pulses results in an increase in the dispersion of the amplitude distribution of pulses.

Keywords: amplitude distribution, silicon photo-electronic multiplier, dispersion.

REFERENCES

1. I. R. Gulakov and A. O. Zenevich, Photo-Receivers of Quantum Systems (Minsk, UO VGKS, 2012) [in Russian].
2. K. Shimizu, M. Fujise, and M. Nunokawa, Electron. Lett. **23** (24), 1307 (1987).
3. E. A. Georgievskaya, S. N. Klemin, L. A. Filatov, P. Zh. Buzhan, B. A. Dolgoshein, A. L. Ilyin, V. A. Kantserov, V. A. Kaplin, A. I. Karakash, A. D. Pleshko, E. V. Popova, and S. Yu. Smirnov, Prikl. Fiz., No. 2, 123 (2003).
4. S. L. Vinogradov, T. R. Vinogradova, V. E. Shubin, and D. A. Shushakov, Bull. Lebedev Phys. Inst., No. 9, 3 (2009).
5. M. A. Asayonak and A. O. Zenevich, Prikl. Fiz., No. 6, 49 (2018).
6. Yu. V. Musienko, E. V. Akhrameev, A. Yu. Afanas'ev, E. N. Gushchin, N. V. Ershov, A. O. Izmailov, Yu. G. Kundenko, B. K. Lubsandorzhev, O. V. Mineev, M. M. Khabibullin, A. N. Khotyantsev, B. A. M. Shaibonov, A. T. Shaikhiev, G. B. Bondarenko, V. M. Golovin, and V. A. Mayatskii, Instruments and Experimental Techniques **51** (1), 101 (2008).