УДК 621.382

АМПЛИТУДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОТООТКЛИКА КРЕМНИЕВЫХ ФОТОЭЛЕКТРОННЫХ УМНОЖИТЕЛЕЙ

DOI 10.36994/2707-4110-2019-1-22-03

Асаёнок М. А., Белорусская государственная академия связи, Минск, Республика Беларусь. ata-rul@mail.ru

Зеневич А. О., д.т.н., проф., Белорусская государственная академия связи, Минск, Республика Беларусь. a.zenevich@bsac.by

Новиков Е. В., к.т.н., доц., Белорусская государственная академия связи, Минск, Республика Беларусь. e.novikov@bsac.by

Аннотация. В настоящее время во многих приложениях необходимы фотоприемники, которые обеспечивают регистрацию оптического излучения в широком диапазоне интенсивностей и позволяют сочетать два режима работы: токовый и счет фотонов. К таким приборам можно отнести кремниевые фотоэлектронные умножители (Si-ФЭУ), имеющие ряд преимуществ по сравнению с электровакуумными фотоумножителями и лавинными фотоприемниками. Однако влияние на характеристики фотоотклика Si-ФЭУ таких важных факторов как напряжение питания и температура изучено недостаточно. В работе исследовано влияние этих факторов на амплитудные параметры фотоотклика Si-ФЭУ. Представлена структурная схема экспериментальной установки, с помощью которой проводились измерения характеристик фотоотклика Si-ФЭУ со структурами p^+-n-p^+ и p^+-p-n^+ , выпускаемых ОАО «Интеграл» (Республика Беларусь). Представлены зависимости средней амплитуды фотоотклика от напряжения питания и температуры кремниевых фотоумножителей для различных длин волн оптического излучения. Получено, что при воздействии на Si-ФЭУ оптическими импульсами с одинаковыми длительностью и энергетической экспозицией в условиях одинаковой температуры при одном и том же перенапряжении амплитуда фотоотклика была большей для Si-ФЭУ со структурой p^+-p-n^+ независимо от длины волны оптического излучения. Установлено, что при изменении перенапряжения рост амплитуды фотоотклика наблюдается только в диапазоне перенапряжений $\Delta U = 0 \div 3$ В для всех исследуемых Si-ФЭУ независимо от длины волны регистрируемого оптического излучения и температуры. Определено, что уменьшение температуры приводило к увеличению амплитуды импульсов фотоотклика. Наиболее сильно зависимость амплитуды фотоотклика от температуры проявлялась для Si-ФЭУ со структурой p^+-p-n^+ . Показано, что зависимости средней амплитуды фотоотклика Si-ФЭУ от энергетической экспозиции

имеют линейный участок, протяженность которого зависит от длины волны регистрируемого оптического излучения.

Ключевые слова: кремниевый фотоэлектронный умножитель, средняя амплитуда фотоотклика.

AMPLITUDE CHARACTERISTICS OF SILICON PHOTO-ELECTRON MULTIPLIER'S PHOTORESPONSE

Maryna Asayonak, Belarusian State Academy of Communications, Minsk, Republic of Belarus. m.asayonok@bsac.by

Andrey Zenevich, Dr. habil., Prof., Belarusian State Academy of Communications, Minsk, Republic of Belarus. a.zenevich@bsac.by

Yauhen Novikau, Ph.D., Belarusian State Academy of Communications, Minsk, Republic of Belarus. e.novikov@bsac.by

Abstract. Currently, in many applications, photodetectors are needed that provide registration of optical radiation in a wide range of intensities and allow combining two operating modes: current mode and photon counting. These devices include silicon photoelectronic multipliers (SiPM), which have a number of advantages compared to electrovacuum photomultipliers and avalanche photodetectors. However, the influence on the photoresponse characteristics of SiPM of such important factors as the supply voltage and temperature has not been studied enough. The influence of these factors on the amplitude parameters of the photoresponse of SiPM is studied. The block diagram of the experimental setup is presented, with the help of which the photoresponse characteristics of SiPM with n^+-n-p^+ and p^+-p-n^+ structures manufactured by Integral OJSC (Republic of Belarus) were measured. The dependences of the average amplitude of the photoresponse on the supply voltage and temperature of silicon photomultipliers for various wave-lengths of optical radiation are presented. It was found that when SiPM were exposed to optical pulses with the same duration and energy exposure at the same temperature at the same overvoltage, the photoresponse amplitude was larger for a SiPMr with p^+-p-n^+ structure regardless of the wave-length of optical radiation. It was found that, when the overvoltage changes, the increase in the photoresponse amplitude is observed only in the overvoltage range $\Delta U = 0 \div 3$ V for all the studied SiPM, irrespective of the wave-length of the detected optical radiation and temperature. It was determined that a decrease in temperature led to an increase in the amplitude of the photoresponse pulses. The temperature dependence of the amplitude of the photoresponse was most pronounced for SiPM with the p^+-p-n^+ structure. It was shown that the dependences of the average amplitude of the photomonitor Si-PM on the energy exposure have a linear section, the length of which depends on the wavelength of the detected optical radiation.

Keywords: silicon photoelectron multiplier, average photoresponse amplitude.

Введение

В настоящее время необходимы фотоприемники, которые обеспечивали регистрацию оптического излучения в широком диапазоне интенсивностей. Такие фотоприемники востребованы в целом ряде приложений: в лидарных системах

для диагностики дальних и высотных слоев атмосферы и водных сред; в оптической связи при передаче информации с одновременным контролем наличия каналов утечки информации; в оптической рефлектометрии волоконно-оптических линий связи; в дозиметрии ионизирующего излучения. Во всех этих приложениях необходимы фотоприемники, которые позволяли бы сочетать два режима работы: токовый и счет фотонов. К таким фотоприемникам относятся электровакуумные фотоумножители, лавинные фотоприемники и кремниевые фотоэлектронные умножители (Si-ФЭУ) [1].

Для реализации рассматриваемых режимов в электровакуумных фотоумножителях и лавинных фотоприемниках необходимо использовать управляемый источник питания, который устанавливает постоянное напряжение питания, соответствующее каждому из этих режимов. Применение такого источника питания со схемой управления усложняет устройство регистрации. Постоянное переключение напряжения питания также может привести к выходу фотоприемника из строя [2].

При помощи Si-ФЭУ удается реализовать сочетание токового режима работы и режима счета фотонов, поддерживая постоянным напряжение питания. Это расширяет сферу применения Si-ФЭУ при регистрации оптического излучения в широком диапазоне интенсивностей по сравнению с электровакуумными фотоумножителями и лавинными фотоприемниками.

Однако в настоящее время недостаточно изучено влияние на характеристики фотоотклика Si-ФЭУ таких важных факторов как напряжение питания и температура. Поэтому целью данной работы является оценка влияния указанных факторов на амплитудные характеристики фотоотклика Si-ФЭУ.

Описание установки и методики эксперимента

В качестве объектов исследования были использованы Si-ФЭУ со структурами n^+-n-p^+ и p^+-p-n^+ , выпускаемые ОАО «Интеграл» (Республика Беларусь). Для выполнения исследований были отобраны случайным образом по 5 экземпляров каждой из структур из партий количеством 100 штук.

Измерения амплитудных характеристик фотоотклика Si-ФЭУ проводились на экспериментальной установке, структурная схема которой представлена на рис. 1. Данная установка работает следующим образом. В качестве источника оптического излучения использовался светодиод СД. При проведении измерений использовались светодиоды с длинами волн оптического излучения 565 нм, 590 нм, 630 нм, 860 нм. Для создания оптических импульсов на светодиод подавались прямоугольные импульсы с генератора Г. Существовала возможность изменения интенсивности оптических импульсов путем изменения коэффициента ослабления набора нейтральных светофильтров Н. Оптическое излучение после прохождения через набор светофильтров Н поступало на вход оптического волокна ОВ. С выхода волокна ОВ излучение подавалось на Si-ФЭУ. Si-ФЭУ помещался в камеру тепла и холода Т. Камера тепла и холода обеспечивала регулировку температуры в диапазоне $203 \div 303$ К.

Напряжение питания подавалось на Si-ФЭУ от регулируемого источника постоянного напряжения И. Между Si-ФЭУ и источником напряжения питания И

был включен амперметр А, контролирующий ток, протекающий через Si-ФЭУ. Напряжение питания, приложенное к Si-ФЭУ, измерялось вольтметром В.

Последовательно с Si-ФЭУ был включен резистор нагрузки R_n (см. рис. 1). Под воздействием оптических импульсов, поступающих на Si-ФЭУ с оптического волокна ОВ, формируются импульсы тока (фотоотклик). В результате на резисторе R_n создаются импульсы напряжения, которые поступают на вход усилителя У с шириной полосой пропускания 500 МГц. Форма импульсов на выходе усилителя контролировалась осциллографом ОС. Импульсы с выхода усилителя подавались на вход аппаратно-программного комплекса АПК. Аппаратно-программный комплекс регистрирует импульсы, поступающие с усилителя У, позволяя определять средние значения амплитуды импульсов, поступивших на его вход.

Рис. 1. Структурная схема экспериментальной установки

В аппаратно-программном комплексе существовала возможность построения по полученным данным зависимости средней амплитуды импульсов от напряжения питания Si-ФЭУ и температуры внешней среды.

В связи с тем, что исследуемые фотоприемники имели напряжения пробоя, отличающиеся между собой по величине, для сравнения характеристик Si-ФЭУ между собой применялась величина перенапряжения $\Delta U = U_n - U_{np}$, где U_n — напряжение питания, U_{np} — напряжение пробоя. Напряжения пробоя Si-ФЭУ U_n определялось по его вольт-амперной характеристике в отсутствии оптического излучения, на основании методики описанной в работе [3].

Результаты эксперимента и их обсуждение

Зависимости амплитуды импульсов фотоотклика от величины перенапряжения представлены на рис. 2. Данные зависимости получены для постоянной температуры $T = 300$ К и длины волны оптического излучения $\lambda = 630$ нм, которая соответствовала максимуму спектральной чувствительности Si-ФЭУ. Для других λ эти зависимости имели схожий вид. Увеличение перенапряжения в диапазоне $\Delta U = 0 \div 3$ В приводило к росту средней амплитуды фотоотклика A_{cp}

для всех типов исследуемых Si-ФЭУ. В этом диапазоне ΔU более сильную зависимость имели Si-ФЭУ со структурой $p+-p-n+$ по сравнению с Si-ФЭУ со структурой $n+-n-p+$. Так отношение изменения средней амплитуды фотоотклика ΔA_{cp} в диапазоне $\Delta U = 0 \div 3$ В к изменению перенапряжения в этом диапазоне ΔU_n составляло для Si-ФЭУ со структурой $p+-p-n+$ $\Delta A_{cp} / \Delta U_n = 8,3 \cdot 10^{-2}$, а для Si-ФЭУ со структурой $n+-n-p+$ $\Delta A_{cp} / \Delta U_n = 4,3 \cdot 10^{-2}$. При дальнейшем увеличении ΔU величина A_{cp} практически не изменялась.

Рис. 2. Зависимости средней амплитуды фотоотклика Si-ФЭУ от перенапряжения: 1 — Si-ФЭУ со структурой $p+-p-n+$; 2 — Si-ФЭУ со структурой $n+-n-p+$

Форма импульсов фотооткликов Si-ФЭУ со структурой $p+-p-n+$ для различных длин волн оптического излучения при значении $\Delta U = 3$ В и постоянной температуре $T = 300$ К представлены на рис. 3. Отметим, что Si-ФЭУ со структурой $n+-n-p+$ имели аналогичную форму импульсов фотоотклика. Данные результаты получены при воздействии на Si-ФЭУ оптическими импульсами с энергетической экспозицией $H = 1,08 \cdot 10^{-7}$ Дж/см² и длительностью импульса 1,0 мкс.

Значение перенапряжения выбиралось с учетом того, что для $\Delta U \geq 3$ В длительность фотоотклика оставалась неизменной для всех исследуемых Si-ФЭУ независимо от их структуры.

Отметим, что увеличение длины волны приводило к небольшому увеличению длительности спада импульсов. Особенно хорошо это проявляется для длины волны 850 нм (рис. 3).

Для всех исследуемых длин волн оптического излучения и постоянной энергетической экспозиции амплитуда импульсов фотооткликов Si-ФЭУ со структурой $p+-p-n+$ была больше чем для Si-ФЭУ со структурой $n+-n-p+$. Это связано с тем, что во всем исследуемом спектральном диапазоне Si-ФЭУ со структурой $p+-p-n+$ имели большие значения таких параметров как квантовый выход η и коэффициент усиления фототока M по сравнению с Si-ФЭУ со структурой $n+-n-p+$. Соответствующие данные приведены в табл. 1.

Зависимости средней амплитуды фотоотклика от температуры представлены на рис.4. Данные зависимости получены при воздействии на Si-

ФЭУ оптическими импульсами с энергетической экспозицией $H = 1,08 \cdot 10^{-7}$ Дж/см². При этом на Si-ФЭУ было подано постоянное значение перенапряжения $\Delta U = 3$ В.

Рис. 3. Форма импульса фотоотклика Si-ФЭУ со структурой $p+-p-n+$
1 — $\lambda_1 = 565$ нм, 2 — $\lambda_2 = 590$ нм, 3 — $\lambda_3 = 630$ нм, 4 — $\lambda_4 = 860$ нм

Таблица 1

Параметры Si-ФЭУ для различных длин волн оптического излучения

Структура Si-ФЭУ	$\Delta U, В$	$\lambda, нм$	η	M	$H_{max}, Дж/см^2$
$p+-p-n+$	3	565	0,62	$6 \cdot 10^4$	$2,2 \cdot 10^{-8}$
		590	0,77	$8 \cdot 10^4$	$2,6 \cdot 10^{-8}$
		630	0,87	$15 \cdot 10^4$	$3,2 \cdot 10^{-8}$
		860	0,12	$3 \cdot 10^4$	$28,3 \cdot 10^{-8}$
$n+-n-p+$	3	565	0,60	$4 \cdot 10^4$	$1,9 \cdot 10^{-8}$
		590	0,71	$6 \cdot 10^4$	$2,2 \cdot 10^{-8}$
		630	0,76	$12 \cdot 10^4$	$2,8 \cdot 10^{-8}$
		860	0,10	$1 \cdot 10^4$	$15,8 \cdot 10^{-8}$

Уменьшение температуры Si-ФЭУ приводило к увеличению амплитуды фотоотклика. При уменьшении температуры в этом диапазоне наблюдался рост амплитуды импульсов в 1,5 раза для Si-ФЭУ со структурой $p+-p-n+$ и в 1,2 раза для Si-ФЭУ со структурой $n+-n-p+$. Такое увеличение средней амплитуды импульсов вызвано увеличением коэффициента усиления фототока Si-ФЭУ с понижением температуры [4]. При уменьшении температуры значение квантового выхода оставалось постоянным. Наиболее сильно зависимость амплитуды фотоотклика от T проявлялась для Si-ФЭУ со структурой $p+-p-n+$. Так значения $\Delta A_{cp}/\Delta T = 1,4$ мВ/К для Si-ФЭУ со структурой $p+-p-n+$ ($\Delta T = T_2 - T_1$ — изменение температуры, $T_2 = 203$ К, $T_1 = 303$ К, $\Delta A_{cp} = A_{2cp} - A_{1cp}$ — изменение средней амплитуды фотоотклика, A_{1c} — амплитуда фотоотклика при T_1 , A_{2c} — амплитуда фотоотклика при T_2), $\Delta A_{cp}/\Delta T = 0,25$ мВ/К для Si-ФЭУ со структурой $n+-n-p+$.

На рис. 5 показаны зависимости средней амплитуды фотоотклика A от величины энергетической экспозиции H_u . Данные получены при постоянных значениях температуры $T = 300$ К, длины волны оптического излучения $\lambda = 630$ нм и перенапряжении $\Delta U = 3$ В. Как видно из представленных на рис. 4 результатов зависимости A от H_u имеют линейный участок и участок насыщения, на котором величина средней амплитуды фотоотклика практически не зависит от значения энергетической экспозиции. Максимальные значения энергетической экспозиции H_{max} для линейного участка A от H_u и различных длин волн оптического излучения представлены в таблице. Увеличение длины волны оптического излучения приводило к росту значения H_{max} (см. табл. 1).

Рис. 4. Зависимости средней амплитуды фотоотклика Si-ФЭУ от температуры: 1 — Si-ФЭУ со структурой p^+-p-n^+ ; 2 — Si-ФЭУ со структурой n^+-n-p^+ .

Рис. 5. Зависимости средней амплитуды фотоотклика Si-ФЭУ от энергетической экспозиции:

1 — Si-ФЭУ со структурой p^+-p-n^+ ; 2 — Si-ФЭУ со структурой n^+-n-p^+

Заключение

В результате выполненных исследований получено, что при воздействии оптическими импульсами с одинаковыми длительностью и энергетической экспозицией на Si-ФЭУ в условиях одинаковой температуры при одном и том же

перенапряжении амплитуда фотоотклика была большей для Si-ФЭУ со структурой p^+-p-n^+ независимо от длины волны оптического излучения.

Установлено, что при изменении перенапряжения рост амплитуды фотоотклика наблюдается только в диапазоне перенапряжений $\Delta U = 0 \div 3$ В для всех исследуемых Si-ФЭУ не зависимо от длины волны регистрируемого оптического излучения и температуры. Поэтому при использовании перенапряжений $\Delta U \geq 3$ В можно предъявлять менее высокие требования к стабильности напряжения питания, чем для $\Delta U = 0 \div 3$ В.

Определено, что уменьшение температуры приводило к увеличению амплитуды импульсов фотоотклика. Наиболее сильно зависимость амплитуды фотоотклика от T проявлялась для Si-ФЭУ со структурой p^+-p-n^+ .

Показано, что зависимости средней амплитуды фотоотклика Si-ФЭУ от энергетической экспозиции имеют линейный участок, длительность которого зависит от длины волны регистрируемого оптического излучения.

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (договор № Т17М-076).

Литература

1. Гулаков, И.Р. Метод счёта фотонов в оптико-физических измерениях / И.Р. Гулаков, С.В. Холондырев. — Минск: Университетское, 1989. — 256 с.
2. Устройство передачи данных по оптическому каналу связи: пат. 17012 Респ. Беларусь, МПК (2006.01) G 08C 23/00 / И.Р. Гулаков, А.О. Зеневич, А.М. Тимофеев; заявитель Бел. гос. ун-т. — № а 20110919; заявл. 30.06.2011; опубл. 30.04.2013. // Официальный бюл. / Нац. Центр интеллектуал. собственности. — 2013. — № 2. — С. 145–146.
3. Грехов И.В., Сережкин Ю.Н. Лавинный пробой p - n -перехода в полупроводниках: монография. // Л.: Энергия, 1980. — 152 с.
4. М.А. Асаёнок, А.О. Зеневич, О.Ю. Горбадей. Температурные характеристики кремниевых фотоэлектронных умножителей. Доклады БГУИР № 2 (112) — 2018. — С. 54–58.

References

1. Gulakov, I.R. Photon counting method in optical-physical measurements / I.R. Gulakov, S.V. Kholondyrev. — Minsk: Universitetskoye, 1989. — 256 p.
2. Device for transmitting data through an optical communication channel: US Pat. 17012 Rep. Belarus, IPC (2006.01) G 08C 23/00 / I.R. Gulakov, A.O. Zenevich, A.M. Timofeev; applicant Bel. state un-t — No. a 20110919; declared 06/30/2011; publ. 04/30/2013. // Official Bulletin. / Nat. The center is intellectual. property. — 2013. — No. 2. — P. 145–146.
3. Grekhov I.V., Serezhkin Yu.N. Avalanche breakdown of the p - n -junction in semiconductors: monograph. // L.: Energy, 1980. — 152 p.
4. M.A. Asayonok, A.O. Zenevich, O.Yu. Hunchback. Temperature characteristics of silicon photomultiplier tubes. BSUIR reports No. 2 (112) — 2018. — p. 54–58.